



Instituto Politécnico Nacional

**Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Unidad Ticomán**

Interpretación y modelado 2D de datos magnéticos y gravimétricos para la exploración de una zona geotérmica en la región de Mexicali-Algodones, Estado de Baja California, México.

T e s i s

**Para obtener el Título de
Ingeniero Geofísico**

Presenta:

Gabriela Sánchez Flores

Asesor Interno:

Ing. Armando Nanco Ortiz

Asesor Externo:

Ing. Camilo Yáñez García

Ciudad de México, 2020.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Presente

Bajo protesta de decir verdad el (la) (los) que suscribe **Gabriela Sánchez Flores**, manifiesto ser autor (a) (es) y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada: **"Interpretación y modelado 2D de datos magnéticos y gravimétricos para la exploración de una zona geotérmica en la región de Mexicali-Algodones, Estado de Baja California, México"**, en adelante "LA TESIS" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante "El IPN", autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales (Publicación en Línea) "La Tesis" por un periodo de (**Tiempo Indefinido**) contando a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "La Tesis".

Adicionalmente, y en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "La Tesis", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "La Tesis", por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de "La Tesis" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a 07 de abril de 2020

Atentamente



Nombre

Gabriela Sánchez Flores



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

Asunto

Registro de Tema

CDMX, 04 de febrero de 2020.

C. GABRIELA SANCHEZ FLORES

**PASANTE DEL PROGRAMA ACADÉMICO DE
INGENIERÍA GEOFÍSICA**

PRESENTE

A continuación, comunico a usted, el tema y contenido que deberá desarrollar en su tesis profesional, indicándole que tiene un año a partir de esta fecha, para elaborarla.

**"INTERPRETACIÓN Y MODELADO 2D DE DATOS MAGNÉTICOS Y GRAVIMÉTRICOS
PARA LA EXPLORACIÓN DE UNA ZONA GEOTÉRMICA EN LA REGIÓN DE
MEXICALI-ALCODONES, ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO".**

- CONTENIDO
- RESUMEN
 - ABSTRACT
 - I. INTRODUCCIÓN.
 - II. MARCO TEÓRICO.
 - III. METODOLOGÍA.
 - IV. RESULTADOS.
 - CONCLUSIONES
 - RECOMENDACIONES
 - BIBLIOGRAFIA
 - ANEXOS

ATENTAMENTE

"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez
Subdirector Académico

FRCH/gach*



**UNIDAD TICOMÁN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA**





Folio
EP Y T/110/2020.

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Oshón de Mendizábal"
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

APROBACIÓN

CDMX, 03/03/20 de 2020.

ING. FERNANDO RODRÍGUEZ CHÁVEZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, hacemos constar que el Tema, por la opción de **Tesis Individual**, **"INTERPRETACIÓN Y MODELADO 2D DE DATOS MAGNÉTICOS Y GRAVIMÉTRICOS PARA LA EXPLORACIÓN DE UNA ZONA GEOTÉRMICA EN LA REGIÓN DE MEXICALI-ALGODONES, ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO"** presentado por la pasante del Programa Académico de **Ingeniería Geofísica**, **C. GABRIELA SANCHEZ FLORES**, fue revisado y aprobado por los suscritos considerándolo ampliamente desarrollado, por lo tanto, esa Subdirección a su cargo, puede señalar fecha para realizar el Examen Oral.

TITULARES


M. en C. **LEOBARDO SALAZAR PEÑA**


ING. **ROBERTO HERNANDEZ ZUÑIGA**


ING. **ALEJANDRO MENDOZA MARAVILLAS**


ING. **IRAIS MARIA LIZETTE ORTIZ PRIETO**


ING. **ARMANDO NANCO ORTIZ**





"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

Folio
EP Y T/035/2020.

Asunto
ASESORIA DE TESIS

CDMX, 24 enero de 2020.

ING. ARMANDO NANCO ORTIZ
P R E S E N T E

En atención a la Solicitud de la **C. GABRIELA SÁNCHEZ FLORES**, pasante del Programa Académico de **Ingeniería Geofísica**, con base en el Reglamento de Titulación Profesional del I.P.N., Capítulo II, Artículo 5, Fracción II y el Artículo 7 Inciso I, se le informa que ha sido seleccionado para asesorar la tesis del pasante mencionado, Por lo que solicito a usted se sirva proponer dentro de un plazo de 30 días calendario, el tema de tesis y contenido a desarrollar por la interesada.

Seguro de contar con su participación, lo saludo cordialmente.

ATENTAMENTE
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez
Subdirector Académico



UNIDAD TICOMÁN
MEDIUNIDAD INGENIERÍA

c.c.p. Ing. Isais María Lizette Ortiz Prieto.- Jefa del Departamento de Innovación Educativa
Interesado

FRCH/betv*





"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

Folio
EP Y T/037/2020.

Asunto
ASESORIA DE TESIS

CDMX, 24 enero de 2020.

ING. CAMILO YAÑEZ GARCÍA
CONSULTOR
PRESENTE

En atención a la Solicitud de la C. **GABRIELA SANCHEZ FLORES** pasante del Programa Académico de **Ingeniería Geofísica** y tomando en consideración sus altos méritos profesionales, me es grato invitarlo a dirigir el trabajo de tesis con fines de titulación profesional que, por la opción de Tesis Individual, deberá desarrollar la interesada, por lo que solicito a usted, se sirva proponer a esta Subdirección el Tema y Contenido.

En la confianza de que contaremos con su colaboración, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez
Subdirector Académico

FRCH/gach*



UNIDAD TICOMAN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA



Agradecimientos

A mí alma mater, el Instituto Politécnico Nacional, ESIA Ticomán y a la compañía Energías Alternas, Estudios y Proyectos S.A de C.V y GEOKERI S.A de C.V por permitirme colaborar con ellos como becaria en el área de exploración y formarme profesionalmente.

A mi asesor interno Ing. Armando Nanco Ortiz por el apoyo, paciencia y tiempo prestado en la elaboración de esta tesis ya que gracias a su experiencia adquirí nuevos conocimientos.

A mi asesor externo Ing. Camilo Yáñez García por su sabiduría, sus consejos y su asesoría en la parte geológica y su experiencia en geotermia me permitió ver un panorama del área en donde quiero desarrollarme profesionalmente.

Al Ing. Roberto Hernández Zúñiga por su asesoría en su experiencia profesional en el área de geotermia, su aporte de información para la elaboración de esta tesis, su apoyo en el área laboral y sus consejos.

Un especial agradecimiento al Ing. Manuel Arrubarrena Moreno por sus enseñanzas, sus exigencias y sus regaños, ya que gracias a él aprendí a trabajar bajo presión, con disciplina y ser mejor profesionista durante mi estancia en Energías Alternas, Estudios y Proyectos S.A de C.V.

Agradezco a mis padres y a mi hermano, por su apoyo y amor condicional ya que gracias a su esfuerzo pude culminar mis estudios.

Finalmente agradezco a mis mejores amigos: Thania Beltrán, Janet Marín, Angélica Delgado, Missael López, Luis León, Ileana Blanco, Reyna Escudero, Ivón Cortes y Ulises Salazar por su amistad, su compañía todos estos años y por su apoyo incondicional.

ÍNDICE

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Capítulo 1. Introducción.....	3
1.1 Objetivos	4
1.1.1 Objetivo general.....	4
1.1.2 Objetivos particulares	4
1.2 Marco de referencia.....	4
1.2.1 Geotermia en el mundo	4
1.3 Marco Geológico y Tectónico Regional.....	7
1.3.1. Marco Geológico Regional.....	7
1.3.2 Geología Estructural y Tectónica	13
1.4. Sistemas Geotérmicos.....	16
1.4.1 Tipos de sistemas geotérmicos.....	16
1.4.1.1 <i>Sistemas Hidrotermales</i>	16
1.4.1.2 <i>Sistemas Geotérmicos mejorados</i>	17
1.4.1.3 <i>Sistemas Geopresurizados</i>	17
1.4.1.4 <i>Sistemas Marinos</i>	17
1.4.1.5 <i>Sistemas Magmáticos</i>	17
1.5. Estudios previos.....	18
1.5.1 Gravimetría	18
1.5.2 Sísmica.....	21
1.5.3 Sistema Geotérmico y pozos.....	22
Capítulo 2.....	26
Marco Teórico	26
2.1 Magnetometría	26
2.1.2 Fundamento Físico.....	26
2.1.3 Permeabilidad y Susceptibilidad magnética.....	28
2.1.4 Geomagnetismo.....	30
2.1.5 Correcciones	31
2.1.6 Anomalía Magnética	33
2.2 Gravimetría	34
2.2.1 Fundamento Físico.....	34

2.2.2 Anomalías Gravimétricas	36
2.2.3 Correcciones Gravimétricas.....	38
2.2.4 Densidades de las rocas	43
Capítulo 3. Metodología	45
3.1 Localización del área de estudio	45
3.1.1 Zona de estudio	45
3.2 Base de Datos.....	46
3.2.1 Datos magnéticos.....	46
3.2.2 Datos gravimétricos.....	47
3.3 Procesamiento y filtrado matemático.....	49
3.3.1 Reducción al Polo.....	49
3.3.2 Separación Regional-Residual.....	50
3.3.2 Derivada vertical	51
3.3.3 Gradiente Horizontal	52
3.3.4 Señal Analítica	53
Capítulo 4 Resultados	55
4.1 Interpretación Estructural.....	55
4.1.1 Modelo Digital de elevación	55
4.2 Interpretación de Mapas Magnéticos.....	58
4.2.1 Mapa de Intensidad Magnética Total	58
4.2.2 Mapa de Anomalía Magnética Reducida al Polo.....	60
4.2.3 Mapa de Configuración Regional de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo.....	62
4.2.4 Mapa de configuración Residual de la Intensidad Magnética Total reducida al Polo.....	64
4.2.5 Mapa de la Primera Derivada Vertical de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo.....	66
4.2.6 Mapa de Gradiente Horizontal de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo.....	68
4.2.7 Mapa de Señal Analítica de la Intensidad Magnética Reducida al Polo.....	70
4.3 Interpretación de Mapas Gravimétricos	73
4.3.1 Mapa de Anomalía de Bouguer.....	73
4.3.2 Mapa de Configuración Regional sobre la Anomalía de Bouguer.....	75
4.3.3 Mapa de Configuración Residual de la Anomalía de Bouguer.....	77

4.3.4 Mapa de Derivada Vertical de la Anomalía de Bouguer	79
4.4.5 Mapa de Gradiente Horizontal Total de la Anomalía de Bouguer	81
4.4.6 Mapa de Señal Analítica de Anomalía de Bouguer	83
4.5 Modelado Magnético y Gravimétrico 2D	85
4.5.1 Perfil 1 Tulecheck-Brawley.....	86
4.5.2 Perfil 2 Cerro Prieto-Algodones.....	89
4.5.3 Perfil 3 Laguna Salada-Algodones	91
4.5.4 Perfil 4 Imperial-Algodones.....	94
.....	95
Conclusiones.....	96
Recomendaciones.....	97
Bibliografía.....	98
ANEXOS	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.- 1 Países con mayor capacidad instalada en geotermia 2019 (IRENA, 2019).....	6
Figura.- 2 Mapa de ubicación de Campos geotérmicos de México bajo Explotación actual (Peláez Zapata, 2017).....	7
Figura.- 3 Columna Geológica- Carta geológico-minera Mexicali, I11-12 Baja California y Sonora (Servicio Geológico Mexicano, 2003).....	9
Figura.- 4 Tectónica general (Espinoza & Mooser, 1964).....	14
Figura.- 5 Estructura Tectónica del Golfo de California (Espinoza & Mooser, 1964).....	14
Figura.- 6 Modelo esquemático de un sistema geotérmico de tipo hidrotermal (Pagán Santini & Rappo Míguez, 2015).....	17
Figura.- 7 Mapa de las Anomalías de Bouguer de la región Tulecheck-Aeropuerto (Fonseca, Díaz. C, Puente, & de la Peña).....	19
Figura.- 8 Modelo gravimétrico de Hussein et al. (2007) sobre el perfil que cruza el centro de la región Salton Trough. Se interpreta un cuerpo gabroico debajo de Salton Trough. D= densidad (Kg/m³), S= susceptibilidad, M= magnetización (A/m), MI = Inclinación magnética (grados), MD= declinación magnética (grados) (Ikediobi, 2013).....	20
Figura.- 9 Perfiles (Líneas rojas) para modelos gravimétricos que cruzan el área de estudio. Pozos (Puntos verdes para restringir el modelo).....	20
Figura.- 10 Modelo del perfil L2E de la corteza oceánica. LBS =Cuenca Laguna Salada, CDD= Canadá David Detachment, LAB= Límite de la astenosfera-litosfera y CPF= Falla Cerro Prieto (Ikediobi, 2013).21	

Figura.- 11 Línea sísmica de reflexión mostrando el ambiente estratigráfico del área de Aeropuerto Oeste (Fonseca, Díaz, C, Puente, & de la Peña).	22
Figura.- 12 Sección geológica general (Lira Herrera, 2005).	22
Figura.- 13 Columna estratigráfica generalizada del área de Cerro Prieto (Puente C. & de la Peña L., 1978).	24
Figura.- 14 Modelo Conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto (Lira Herrera, 2005).	25
Figura.- 15 Fuerza de atracción entre una carga positiva y una carga negativa desplazadas a una distancia (r) (modificado) (Roy Kumar, 2008).	27
Figura.- 16 Diferentes tipos de comportamiento magnético (Caballero Miranda, 2011).	29
Figura.- 17 Tabla de susceptibilidades magnéticas de las rocas y minerales (Telford, Geldart, & Sheriff, 1990).	30
Figura.- 18 Elementos del campo geomagnético terrestre (Lowrie, 2007).	31
Figura.- 19 Gráfica de número de días con una tormenta geomagnética por año (Space Weather Prediction Center, 2020).	32
Figura.- 20 Modelo Magnético Mundial-Intensidad Total del Campo Principal (F) (NOAA, 2019).	33
Figura.- 21 Representación vectorial del campo geomagnético con y sin una anomalía magnética sobrepuesta. Donde B= Inducción Magnética, H= Campo Magnético, Z= Componente Vertical y I=Inclinación (Magnetic surveying, 2002).	34
Figura.- 22 La masas m y m_0 experimentan una misma fuerza gravitacional la cual es proporcional a m, m_0, y r^{-2}. Por convención, el vector unitario r se dirige desde la fuente gravitacional hasta el punto de observación, el cual en este caso se localiza en una masa de prueba m_0 (Blakely, 1996)	35
Figura.- 23 Relación entre el campo gravitacional y las componentes de la anomalía gravimétrica de una masa pequeña (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).	37
Figura.- 24 Curva de deriva gravimétrica construida a partir de lecturas repetidas de un lugar fijo (Kearey, Brooks, & Hill, An Introduction to Geophysical Exploration, 2002).	38
Figura.- 25 a) Corrección por Aire Libre. b) La región sombreada corresponde a una losa de roca de espesor h que se extiende hasta el infinito en ambas direcciones horizontales. c) Corrección por terreno (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).	40
Figura.- 26 Tabla de Correcciones de terreno (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).	42
Figura.- 27 Retícula de Hammer utilizada en el cálculo de correcciones de terreno con zonas que varían en un radio de 2 a 21.9 Km, se utiliza con mapas topográficos de diferentes escala (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).	42
Figura.- 28 Tabla de rangos de densidades aproximados (g/cm^3) de algunos tipos de rocas (Kearey, Brooks, & Hill, An Introduction to Geophysical Exploration, 2002).	44
Figura.- 29 Localización del Área de Estudio (Google Maps, 2019).	45
Figura.- 30 Ubicación de la zona de interés (Modelo Digital de Elevación INEGI, 2019).	46
Figura.- 31 Mapa de Intensidad de Campo Total de Mexicali, Baja California (Servicio Geológico Mexicano, 2001).	47

Figura.- 32 Mapa de Anomalía de Bouguer (Oasis Montaj-Geosoft).	48
Figura.- 33 a) Anomalía Magnética de Campo Total b) Reducción al Polo (Instituto Mexicano del Petróleo , 2015).	50
Figura.- 34 a) Anomalía Magnética b) Anomalía Magnética Regional c) Anomalía Magnética Residual-Oasis Montaj.	51
Figura.- 35 a) Anomalía Magnética b) Primera derivada vertical de la Anomalía Magnética- Oasis Montaj.	52
Figura.- 36 a) Anomalía Magnética b) Gradiente Horizontal de la anomalía Magnética- Oasis Montaj. . 53	
Figura.- 37 a) Anomalía Magnética b) Gradiente Total o Señal Analítica de la Anomalía Magnética- Oasis Montaj.	54
Figura.- 38 Interpretación de Lineamientos Estructurales Regionales de la zona Norte del Estado de Baja California sobre el Modelo Digital de Elevación (INEGI, 2019. Se observan las localidades principales: Mexicali, Ensenada, San Luis Río Colorado (puntos rosas) y el volcán Cerro Prieto (triangulo rojo). Se muestra el límite de frontera entre México y Estados Unidos (línea blanca).	56
Figura.- 39 Lineamientos Estructurales Interpretados sobrepuestos en el Mapa de Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se observan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos rosas) y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo). Se observan los pozos que se perforaron sobre la región estudiada(puntos negros).	57
Figura.- 40 Mapa de Intensidad Magnética Total. Se visualiza los lineamientos magnéticos interpretados (lineas punteadas blancas). Se observan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos rosas) y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo).	59
Figura.- 41 Mapa de Intensidad Magnética Total Reducida al polo. Se observa el sistema de fallas de la región proyectadas del mapa geológico de Mexicali por SGM y de Anomalía de Bouguer de la zona Aeropuerto Este-San Luis Río Colorado y Tulecheck-Aeropuerto (Fonseca, Díaz. C, Puente, & de la Peña), las cuales son: Falla Chupamirtos, Laguna Salada, Cucapá, Pescadores, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Imperial, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Calipatria, Browley San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones y el lineamiento Río Colorado (lineamientos negros). Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo).	61
Figura.- 42 Mapa de configuración Regional de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se observan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo).	63
Figura.- 43 Mapa de Configuración Residual de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se observa el sistema de fallas de la región proyectadas del mapa geológico de Mexicali por SGM y de Anomalía de Bouguer de la zona Aeropuerto Este-San Luis Río Colorado y Tulecheck-Aeropuerto (Fonseca, Díaz. C, Puente, & de la Peña), las cuales son: Falla Chupamirtos, Laguna Salada, Cucapá, Pescadores, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Imperial, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Calipatria, Browley San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones y el lineamiento Río Colorado (lineamientos negros). Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo).	65
Figura.- 44 Mapa de Primera Derivada vertical de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo).	67
Figura.- 45 Mapa de Gradiente Horizontal Total de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se observa el sistema de fallas de la región proyectadas del mapa geológico de Mexicali por SGM y de	

Anomalía de Bouguer de la zona Aeropuerto Este-San Luis Río Colorado y Tulecheck-Aeropuerto (Fonseca, Díaz, C, Puente, & de la Peña), las cuales son: Falla Chupamirtos, Laguna Salada, Cucapá, Pescadores, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Imperial, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Calipatria, Browley San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones y el lineamiento Río Colorado (lineamientos negros). Se muestran los lineamientos magnéticos interpretados (líneas blancas punteadas) Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo). 69

Figura.- 46 Mapa de Primera Señal Analítica de Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se observa el sistema de fallas de la región proyectadas del mapa geológico de Mexicali por SGM y de Anomalía de Bouguer de la zona Aeropuerto Este-San Luis Río Colorado y Tulecheck-Aeropuerto (Fonseca, Díaz, C, Puente, & de la Peña), las cuales son: Falla Chupamirtos, Laguna Salada, Cucapá, Pescadores, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Imperial, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Calipatria, Browley San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones y el lineamiento Río Colorado (lineamientos negros). Se muestran los lineamientos magnéticos interpretados (líneas blancas punteadas) Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo). 72

Figura.- 47 Mapa de Anomalía de Bouguer. Se visulizan las localidades principales: San Luis Río Colorado (punto negro) y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo). 74

Figura.- 48 Mapa de Configuración Regional de la Anomalía de Bouguer. Se visulizan las localidades principales: San Luis Río Colorado (punto negro) y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo). 76

Figura.- 49 Mapa de Configuración Residual de la Anomalía de Bouguer. Se observa el sistema de fallas de la región proyectadas del mapa geológico de Mexicali por SGM y de Anomalía de Bouguer de la zona Aeropuerto Este-San Luis Río Colorado y Tulecheck-Aeropuerto (Fonseca, Díaz, C, Puente, & de la Peña), las cuales son: Falla Chupamirtos, Laguna Salada, Cucapá, Pescadores, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Imperial, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Calipatria, Browley San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones y el lineamiento Río Colorado (lineamientos negros). Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo). 78

Figura.- 50 Mapa de Derivada Vertical de la Anomalía de Bouguer. Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo). 80

Figura.- 51 Mapa de Gradiente Horizontal Total de la Anomalía de Bouguer. Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo). 82

Figura.- 52 Mapa de Señal Analítica de Anomalía de Bouguer. Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo). 84

Figura.- 53 Distribución de perfiles modelados sobre el mapa de Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se observan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo). 85

Figura.- 54 Modelo magnético y gravimétrico del Perfil Tulecheck-Brawley (P1-P1'). 88

Figura.- 55 Modelo magnético y gravimétrico del Perfil Cerro Prieto-Algodones (P2-P2'). 90

Figura.- 56 Modelo magnético y gravimétrico del Perfil Laguna Salada-Algodones (P3-P3'). 93

Figura.- 57 Modelo magnético y gravimétrico del Perfil Imperial-Algodones (P4-P4'). 95

Resumen

En este trabajo se realizó el procesamiento, interpretación y modelado 2D de datos magnéticos y gravimétricos en la parte Norte del Estado de Baja California para evaluar un nuevo sitio con potencial geotérmico en la región Mexicali-Algodones, Baja California, México, asociado con altos gradientes magnéticos y gravimétricos. Inicialmente se realizaron investigaciones previas de los estudios magnéticos y gravimétricos hechos en la zona, así como también una evaluación general de las condiciones geológicas-estructurales partiendo de los estudios hechos en el Campo Geotérmico Cerro Prieto.

En el procesamiento de la información magnética y gravimétrica se aplicaron una serie de procesos matemáticos (filtros), los cuales fueron los siguientes: reducción al polo, separación regional-residual, derivadas verticales, gradiente horizontal total y señal analítica, estos permiten resaltar lineamientos estructurales (contactos litológicos, fallas) y acentuar los bordes de las fuentes someras y regionales.

Para el desarrollo del modelado bidimensional de las anomalías magnéticas y gravimétricas se integro información de geología de pozos y modelos regionales para establecer la geometría de las estructuras geológicas del subsuelo y la relación con la respuesta magnética y gravimétrica del sitio y así construir el modelo geotérmico de la zona.

Abstract

In this work developed processing, interpreting and modeling 2D of magnetic and gravimetric data in the Northern part of state of Baja California to evaluate a new site with geothermal potential in Mexicali-Algodones, Baja California, Mexico region, associated with high magnetic and gravimetric gradients.

Initially, developed previous research surveys of magnetic and gravimetric done in the zone, as also evaluated geological-structural conditions based on the studies developed in the Cerro Prieto geothermal field.

In the magnetic and gravimetric data processing consisted in the application of mathematical processing (filters) which were the following: reduction to the pole, regional-residual separation, vertical derivative, total horizontal gradient and analytic signal, these allow enhance structural guidelines (lithology contacts, faults) and accentuate the edges of shallow and regional sources.

For the development two-dimensional modeling of the magnetic and gravimetric anomalies were taken geological information of wells and regional models allowing to establish the geometry of the geological structures of the subsurface related to magnetic and gravimetric response of the site and thus build the geothermal model of the area.

Capítulo 1. Introducción

Uno de los retos más importantes actualmente a nivel mundial es disminuir la generación y consumo de energía eléctrica derivado de combustibles fósiles: petróleo, gas natural y carbón, debido a que sus emisiones al momento de generar este tipo de energía son muy contaminantes para el medio ambiente; ante esta realidad se busca extender la generación de energía eléctrica mediante el uso de fuentes limpias como la energía geotérmica, por medio del aprovechamiento del calor interno de la tierra.

A nivel mundial, México es el sexto país en capacidad instalada para generar energía geotérmica (IRENA, 2019), ya que por sus características geológicas tiene un alto potencial geotérmico que aún no ha sido explorado en su totalidad.

En noviembre de 1959 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) inicio la explotación de Campos Geotérmicos en México, instalando la primera planta experimental con capacidad de generación de 3.5 MW (Megawatts) en la zona de Pathé, en el estado de Hidalgo, México.

Desde esa fecha CFE ha venido operando cuatro campos geotérmicos: Cerro Prieto (Baja California) que es el campo con mayor producción y generación en el país y en Latinoamérica, Los Azufres (Michoacán), Los Humeros (Puebla) y Tres Vírgenes (Baja California Sur) de tipo hidrotermal, por otra parte Grupo Dragón una empresa privada mexicana tiene en operación el campo denominado Domo de San Pedro, en el Estado de Nayarit, (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, CeMIEGeo, 2014-2019). Estos cinco campos geotérmicos en conjunto generan 951 MW de capacidad Instalada (IRENA, 2019).

Con base en lo anterior y la necesidad de la búsqueda de nuevos sitios con probabilidad de desarrollo geotérmico, se propone en este trabajo la región de Mexicali-Algodones, Baja California, México.

Para la evaluación del área se recopilaron y analizaron datos magnéticos, gravimétricos y geológicos; integrándolos para realizar el modelado bidimensional de 4 perfiles dentro de la zona de estudio, los resultados obtenidos apoyaron la interpretación y delimitación de las estructuras geológicas de interés y así evaluar

si podría tener potencial geotérmico y si es factible explotarlo para que en un futuro se pueda generar energía eléctrica en este sitio.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Realizar modelado geofísico 2D a partir de la integración de datos magnéticos, gravimétricos, información de pozos y geología, con el fin de interpretar anomalías asociadas con un posible sistema geotérmico en la zona de Mexicali-Algodones, Baja California, México.

1.1.2 Objetivos particulares

- Procesar los datos de intensidad magnética total y de anomalía de Bouguer, para resaltar contactos o cambios litológicos, lineamientos y estructuras de interés, aplicando diferentes procesos de filtrado: derivada vertical, gradiente horizontal total, señal analítica y separación residual y regional.
- Incorporar la información de pozos e integrar los datos geológicos del área de estudio, relacionando las variaciones magnéticas y gravimétricas con los cambios litológicos registrados.

1.2 Marco de referencia

1.2.1 Geotermia en el mundo

La palabra geotermia se refiere al calor natural existente en el interior de la Tierra. Este calor tiene dos fuentes: el colapso gravitatorio que formó la Tierra y el decaimiento radioactivo de varios isótopos en la corteza terrestre. En la práctica se denomina geotermia al estudio y utilización de la energía térmica que es transportada a través de la roca y/o fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma dando origen a los sistemas geotérmicos (Arellano Gómez, Iglesias Rodríguez, & García Gutiérrez, 2008).

El comienzo de la industria geotérmica en el mundo remonta a la segunda mitad del año 1800 en Larderello, Italia; con el descubrimiento de la presencia de ácido bórico en las manifestaciones superficiales, conscientes de las cualidades

geológicas del lugar; un pequeño grupo de emprendedores formo la primera empresa geotérmica. En 1904, en el poblado de Toscana, se realiza el primer experimento de generación de energía eléctrica utilizando el vapor geotérmico, y en 1913 se instala la primera planta generadora comercial, nombrada como Larderello 1, operando con una producción de 250 KW (Capetti, 2016).

En los años posteriores hubo un avance progresivo en esta industria que hizo que en el año 1958, Italia fuera el único país en el mundo capaz de desarrollar y generar tecnología geotérmica (Casardi, 2016).

En 1971 se habían instalado en el mundo 903 MW con energía geotérmica. El 99% de esta capacidad estaba concentrada en cuatro naciones: Italia, Nueva Zelanda, Estados Unidos y Japón. Para 1982 se encontraban distribuidas 115 plantas geotermoeléctricas en 14 países, con una capacidad instalada de 2,732.5 MW. Hoy en día se pronostica que la capacidad geotermoeléctrica se duplique en los próximos 50 años (Arellano Gómez, Iglesias Rodríguez, & García Gutiérrez, 2008). Actualmente los campos geotérmicos generan un total de 6.041 GW, los países con mayor capacidad instalada en geotermia hasta el 2019 son: Indonesia, Filipinas, Turquía, Nueva Zelanda, México, Italia, Islandia, Kenia y Japón (Figura 1).

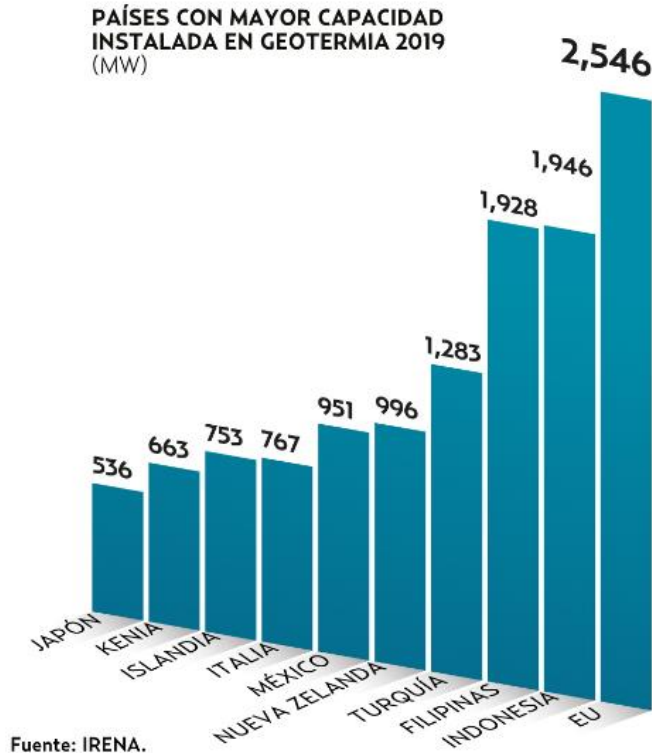


Figura.- 1 Países con mayor capacidad instalada en geotermia 2019 (IRENA, 2019).

Los recursos geotérmicos para la generación de electricidad en México se empezaron a aprovechar desde 1959, en el campo geotérmico (que ya no opera) Pathé Hidalgo; siendo la primera planta en el continente Americano; antes incluso que las de Estados Unidos; por lo que a nivel Internacional México es un buen referente en el tema de geotermia.

Actualmente se encuentran bajo explotación comercial cinco campos geotérmicos que generan 951 MW. Cuatro centrales o plantas están a cargo de la CFE y la quinta, corresponde a Grupo Dragón de origen privado (Figura 2).

El primer campo más grande en México corresponde a Cerro Prieto, ubicado en el estado de Baja California, su capacidad instalada es de 570 MW, generación que representa cerca del 40 % de la demanda energética de Baja California.

El segundo campo geotérmico más grande se localiza en Michoacán llamado Los Azufres, cuenta con una capacidad instalada de 247.9 MW.

Los Humeros es el tercer campo geotérmico más importante de México, se sitúa en la porción oriental del Cinturón o Faja Volcánica Transmexicana, en Puebla. Generando una capacidad instalada de 95.7 MW.

Las Tres Vírgenes en Baja California Sur es el cuarto campo geotérmico, su capacidad instalada es de 10 MW.

Finalmente el quinto campo geotérmico perteneciente a la iniciativa privada es el Domo de San Pedro en Nayarit, con una capacidad instalada de 35.5 MW (Carranza Cacho, 2018).



Figura.- 2 Mapa de ubicación de Campos geotérmicos de México bajo Explotación actual (Peláez Zapata, 2017).

1.3 Marco Geológico y Tectónico Regional

1.3.1. Marco Geológico Regional

La evolución geológica de la Península de Baja California y del noreste de Sonora es compleja, debido a que los eventos geológicos antiguos fueron borrados por los eventos plutónicos del Cretácico-Terciario y enmascarados por eventos tectónicos que acontecieron del Mioceno al Cuaternario (Consejo de Recursos Minerales, 2001).

La formación de la corteza continental ocurrió durante dos eventos geológicos importantes: El primero, empezó desde el Jurásico hasta el Cretácico Tardío, donde hubo un depósito de estratos volcánicos y el emplazamiento regional de rocas graníticas, este periodo fue seguido por una intensa exhumación del basamento a finales del Cretácico e inicios del Terciario. El segundo evento importante es el proceso de extensión continental durante el Mioceno, afectando gran parte del noreste de México, culminando con el adelgazamiento y ruptura continental en el Golfo de California durante el Plioceno (Hernández Márquez, 2016).

Estratigrafía Regional

El contexto geológico que tiene la región de Mexicali, corresponde a unidades desde el Precámbrico hasta el Cenozoico (Figura 3), representadas principalmente por rocas ígneas plutónicas del Cretácico-Terciario, sedimentos aluviales del Pliocuaternario, escasos afloramientos de rocas volcánicas sedimentarias Terciarias, plutónicas Jurásicas, metamórficas Precámbricas y Paleozoicas (Consejo de Recursos Minerales, 2001).

SIMBOLOGÍA CUATERNARIO

Qhoco	RÓLICO
Qhoal	ALUVIÓN
Qhopa	PALUSTRE
Qpthoa	ARENA
Qptho _{lm}	LIMO
Qptho _{lac}	LACUSTRE
Qptho _{Cgp}	CONGLOMERADO POLIMÍCTICO
Qptho _{B-A}	BASALTO - ANDESITA
Qpt _{Cgp-Ar}	CONGLOMERADO POLIMÍCTICO - ARENISCA

TERCIARIO

NEÓGENO	
TplQpt _{Ar-Cgp}	ARENISCA - CONGLOMERADO POLIMÍCTICO
TplBrp	BRECHA POLIMÍCTICA
Tpl _{Ar-Lm}	ARENISCA - LIMOLITA
TmTA-TDa	TOBA ANDESÍTICA - TOBA DACTÍLICA
TmA-B	ANDESITA - BASALTO

TRIÁSICO - PÉRMICO

PpTr _{Ma-E}	MÁRMOL - ESQUISTO
----------------------	-------------------

CARBONÍFERO - DEVÓNICO

Pdc _{E-Ma}	ESQUISTO - MÁRMOL
---------------------	-------------------

PROTEROZOICO

pTim _{Gn-E}	GNEIS - ESQUISTO
----------------------	------------------

ROCAS ÍGNEAS INTRUSIVAS

TcMs _{Gd}	MONZONITA - GRANODIORITA
TpaGd	GRANODIORITA
KsTu	TONALITA
Ks _{Gd-Tu}	GRANODIORITA - TONALITA
KsD	DIORITA
JmGr	GRANITO
Jm _{(?)Gd}	GRANODIORITA

COLUMNA GEOLÓGICA

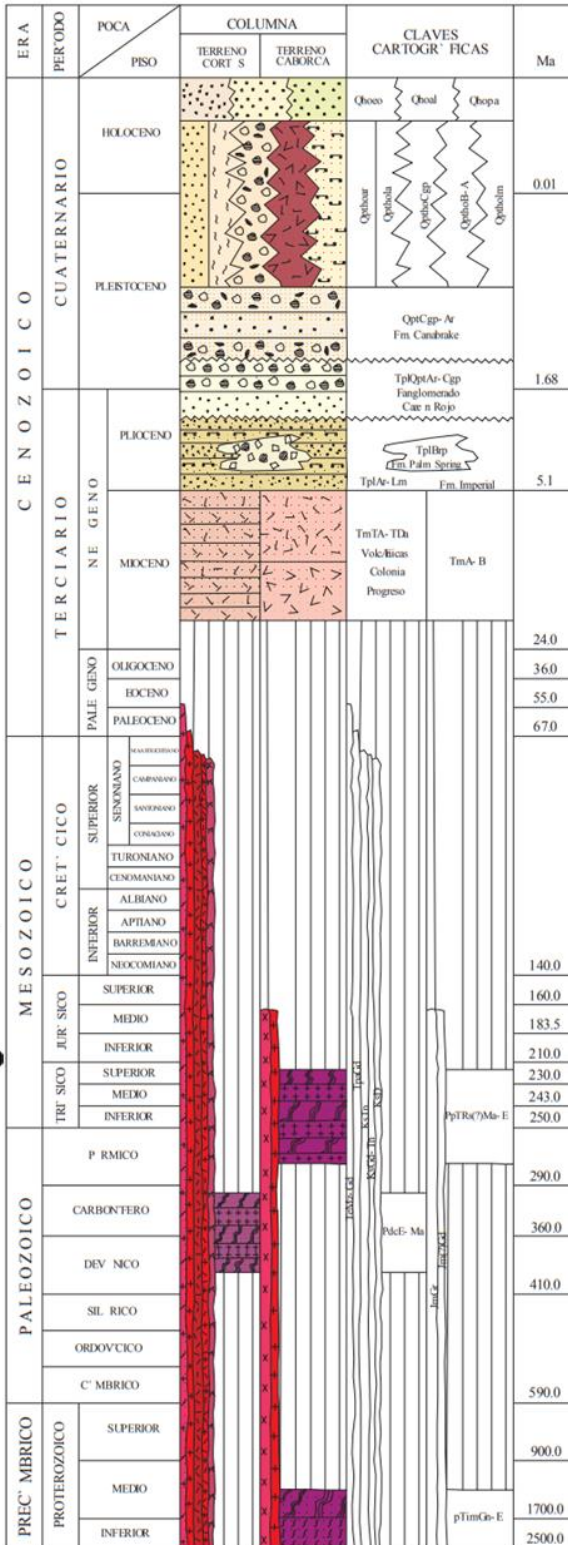


Figura.- 3 Columna Geológica- Carta geológico-minera Mexicali, I11-12 Baja California y Sonora (Servicio Geológico Mexicano, 2003).

1.3.1.1 Unidad del Precámbrico

El conjunto sedimentario del Precámbrico aflora en el área de la franja Noroccidental del Estado de Sonora representado por rocas intrusivas con edades de 1,700-1,800 m.a. (millones de años).

Las Rocas de esta franja corresponden litológicamente a esquistos de cuarzo, moscovita, cuarcitas y gneises de biotita; el cuarzo y el feldespato con edades mínimas de 1,750 m.a. Las rocas metamórficas de esta área presentan minerales típicos de la facies de anfibolita (Roldan-Quintana, 1982).

En la región Sur de Caborca se define un anticlinal con orientación N-NE que se denomina anticlinal de Bámori compuesto de rocas metamórficas e ígneas plutónicas, que representa el basamento más antiguo que se conoce en el Noreste de México, afectado por diques de composición diorítica y riódacítica (Teran Ortega, Peña Leal, Contreras Orantes, & García Duarte , 2001).

Otras áreas de afloramiento del Precámbrico medio consisten en granitos porfídicos; estructuralmente las rocas de este periodo son complejas, siendo el resultado de al menos tres periodos de actividad intrusiva y eventos metamórficos, localizado entre San Luis Río Colorado y Sonora (Roldan-Quintana, 1982).

1.3.1.2 Unidad del Paleozoico

Dentro de esta unidad se tienen dos principales grupos de rocas: sedimentarias y metamórficas. Las sedimentarias en su mayoría son calizas masivas, recristalizada y parcialmente silicificadas; afectadas por cuerpos intrusivos y diques del Cretácico cubiertas discordantemente por volcanoclásticos y basaltos del Terciario Superior (INEGI , 2001).

Las rocas metamórficas están representadas por gneis, esquistos, metasedimentos y mármol. Estas rocas derivan de un protolito sedimentario del Carbonífero que consiste de limonitas, calizas, areniscas calcáreas, expuestas en la Sierra Las Pintas.

Secuencia Las Pintas

Es una secuencia metasedimentaria con restos de crinoides, corales y braquiópodos del Carbonífero. Se encuentra ampliamente aflorando en la parte Norte-Sur de la Sierra Cucapá y El Mayor en la parte Oeste-Suroeste de Mexicali. La unidad presenta intercalaciones de esquistos, mármoles con gneis, cuarzos feldespáticos-calcosilicatados, meta-areniscas, cuarcitas que se encuentran altamente deformadas así como afectadas por alteración hidrotermal que genera zonas de sulfidación y oxidación.

Secuencia Gran Cañón

Es una secuencia metasedimentaria con presencia de crinoides columnares y braquiópodos, aflora en el sector poniente de Mexicali de manera aislada en cuatro pequeños cerros: en el desierto de Altar al Sur del Ejido Aquiles Serdán y al Sureste de San Luis Río Colorado. Está constituida por una alternancia de mármol, esquistos y cuarcita. Estos afloramientos se encuentran fuertemente fracturados y tienen una fuerte deformación por cizalla presentando metamorfismo regional de facies de esquistos verdes y anfibolitas e intenso hidrotermalismo (Consejo de Recursos Minerales, 2001).

1.3.1.3 Unidad del Mesozoico

Esta unidad es una secuencia volcanosedimentaria del Cretácico Inferior, está compuesta por rocas sedimentarias marinas, volcánicas intermedias y félsicas; los afloramientos presentan metamorfismo, conformando la Formación Alisitos (INEGI , 2001).

Formación Alisitos

Formada a partir de un arco volcánico, aflora en la parte Occidental de Baja California, consta de tres unidades: la base está formada por tobas líticas cristalinas, escasos derrames andesíticos y dacíticos; la parte media presenta una alternancia de riolita, toba riodacítica y dacítica, la cima de la formación está compuesta de derrames riolíticos (INEGI , 2001).

Batolito Peninsular

Es un Arco volcánico plutónico que se extiende desde el Norte de Sonora a través de lo que ahora se conoce como el Sur de la Península de Baja California y Sur de México; a lo largo de la península muestra rocas de edad Jurásico Superior y Mesocretácico, de composición en su mayoría andesítica y de origen volcanoclástico, estas rocas volcánicas yacen sobre estratos marinos de edad Triásico Superior a Jurásico Superior. Este Arco fue dividido en tres sub-zonas petrográficas: una sub-zona de gabro al Oeste, después una sub-zona central de tonalita y otra sub-zona de adamelita al Este; éstas dos últimas afloran ampliamente en la Sierra Juárez en el extremo Oeste-Suroeste de Mexicali, también se observan en el Cerro Centinela, parte Norte de la Sierra Cucapá y parte centro Sur en la Sierra El Mayor (Consejo de Recursos Minerales, 2001).

1.3.1.4 Unidad del Cenozoico

Está representado por secuencias sedimentarias, la cima de esta unidad está compuesta por brechas máficas asociadas a basaltos, andesitas basálticas y brechas.

El Terciario Superior es de origen sedimentario, está representado por rocas marinas, fluviales y eólicas.

El Mioceno está compuesto por secuencias sedimentarias formadas de areniscas y conglomerados en su mayoría; en la base de esta unidad hay presencia de litoarenitas continentales interestratificadas con horizontales de limonitas y conglomerados, en la cima se manifiestan conglomerados polimícticos, intercalados con areniscas (INEGI , 2001).

Se asigna al Plioceno, una secuencia de areniscas y conglomerados de origen marino con algunos fósiles, principalmente pelecípodos y gasterópodos. La parte inferior se clasifica como litoarenitas y algunas como arcósicas.

El Cuaternario se caracteriza por el volcanismo máfico y por el desarrollo de depósitos no consolidados. Afloran basaltos como derrames cordados. En cuanto a depósitos sedimentarios de esta edad hay una gran variedad de suelos, entre los que destacan los de carácter litoral, aluvial, eólico, palustre y lacustre; los aluviales

se encuentran constituidos por areniscas y conglomerados que forman extensos abanicos hacia las costas del Golfo de California (INEGI , 2001).

Formación Imperial, Palm Spring y Canabrake

Estas unidades están principalmente constituidas de areniscas arcóscicas, limolitas, lodolitas rojas y algunos horizontes de tobas. Estos sedimentos se depositaron esencialmente en un ambiente deltaico no marino.

La formación Imperial aflora en las Montañas Coyote al Norte del Valle Imperial, mientras que la Formación Palm Spring aflora en la zona Noroeste, centro y Sur de Mexicali en el borde Este de la Laguna Salada.

La Formación Canabrake aflora en el Suroeste de la Sierra Cucapá constituida por una secuencia de rocas clásticas que subyacen de la Formación Palm Spring (Consejo de Recursos Minerales, 2001).

1.3.2 Geología Estructural y Tectónica

La configuración del Golfo de California comenzó durante el Plioceno Temprano hace 5 millones de años (Lippmann, Goldstein, Halfman, & Witherspoon, 1984), forma parte de un cordón volcánico denominado el Alto del Pacífico Oriental que se extiende desde las costas de Chile para continuar al Mar de Cortés hasta prolongarse al interior del Continente Norteamericano (Figura 4). Tiene notables analogías de origen y estructura en la región del delta del Río Colorado y el Valle Imperial, ya que se une al Alto del Pacífico Oriental un fracturamiento tectónico importante que se conoce como el Sistema de Fallas de San Andrés, intensificando la debilidad cortical regional.

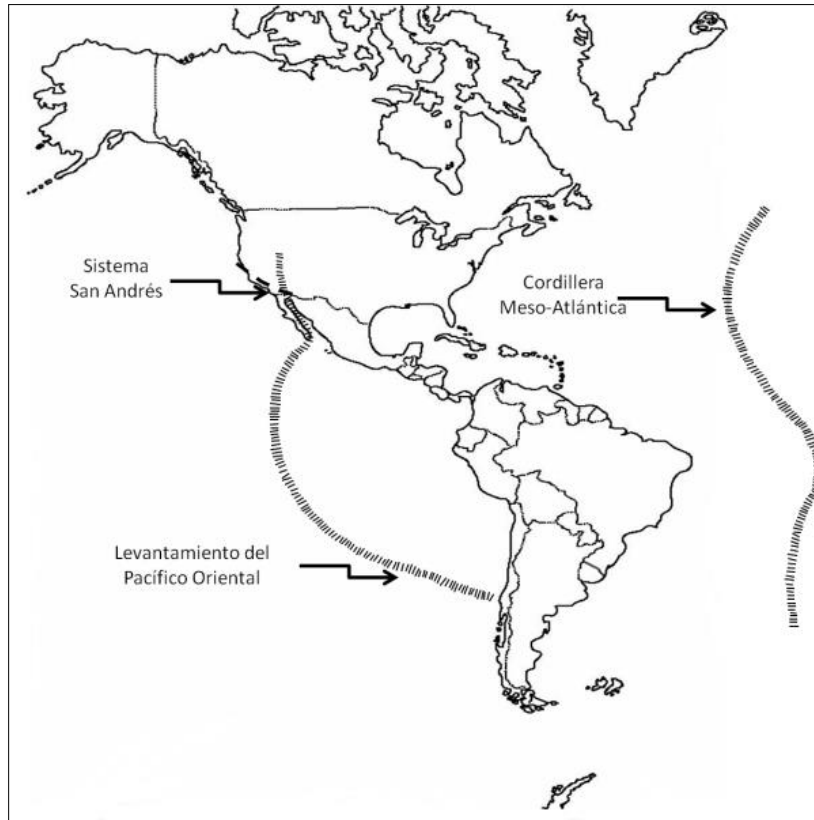


Figura.- 4 Tectónica general (Espinoza & Mooser, 1964).

La estructura tectónica fundamental de este fracturamiento cortical es de bloques (Figura 5); la parte central representa un geotumor (levantamiento del manto que lleva consigo un levantamiento de la corteza, que hace resbalar los materiales sedimentarios) (Álamo, 1994), cuya porción media se ha hundido para formar una fosa (Figura 5) (Espinoza & Mooser, 1964).

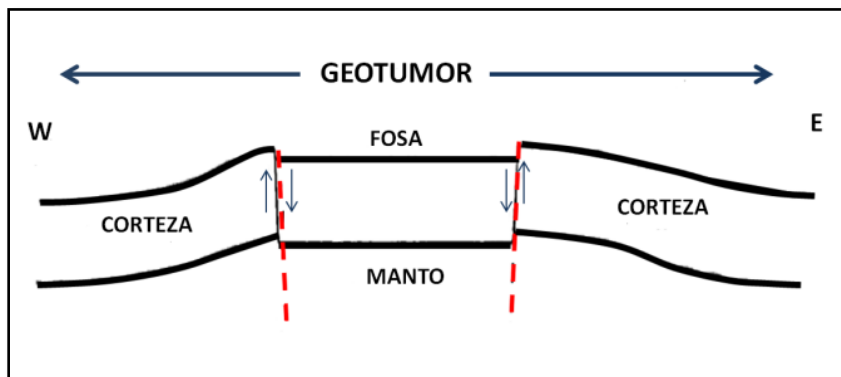


Figura.- 5 Estructura Tectónica del Golfo de California (Espinoza & Mooser, 1964).

El proceso del Rifting culminó con la formación del Golfo de California, esta fase se desarrolló a lo largo de la antigua unión entre el Arco magmático en el Mesozoico al Oeste y el margen crátonico en el Proterozoico-Paleozoico al Noreste. Con base en estos dos eventos se originaron: rocas pre-batolíticas metamorfozadas en el Jurásico Tardío como intrusiones magmáticas en el Cretácico Tardío y rocas post-batolíticas que se formaron al final del Cretácico e inicios del Terciario (65 a 25 m.a.) (Barajas, 2014).

El norte de la Península de Baja California está cortado por sistemas de fallas normales, originadas por esfuerzos transtensivos entre las Placas de Norteamérica y del Pacífico, lo que ha ocasionado la separación de la península de la zona continental. De acuerdo con la deformación y actividad tectónica se define la provincia extensional del Golfo por estructuras formadas durante el proceso extensional del Mioceno Temprano que después se convirtió en un proceso transtensional a finales del Mioceno Tardío (7-9 m.a). Esta evolución dio lugar a dominios extensionales que evolucionaron a centros de dispersión, limitados por fallas transformantes en el Golfo de California, transfiriéndose hacia el Norte a través del sistema de Fallas de San Andrés al Norte de la Cuenca de Salton. Esta zona se extiende al Este del Escarpe Principal del Golfo, limitando cuencas y sierras, estas últimas levantadas durante la extensión Miocénica (Hernández Márquez, 2016).

Las fallas más importantes que se tienen detectadas con continuidad al estado de California actualmente activas son: las fallas Cerro Prieto, Imperial y Algodones con rumbo preferencial NW-SE. En la Sierra Cucapá se tienen las fallas Laguna Salada, Borregos, Pescadores y Cucapá, también activas con una evolución más compleja, estas tres últimas del Postmioceno. La falla Laguna Salada durante el evento distensivo del Mioceno tuvo un comportamiento lístrico, que evolucionó a dextral normal, debido al cambio transtensivo del Mioceno-Plioceno. En la parte de la sierra El Mayor se tiene las fallas de tipo detachment Cañada David: que profundiza bajo la zona de Laguna Salada y finalmente se tiene un lineamiento posiblemente relacionado con la estructura del Río Colorado (Servicio Geológico Mexicano, 2003).

1.4. Sistemas Geotérmicos

Un sistema geotérmico cuenta con un área de recarga, un canal o zona de calentamiento y un área de descarga. Estos sistemas pueden clasificarse como locales y regionales: Los sistemas locales están confinados y tienen la particularidad de que el agua y la energía térmica se originan en la misma área, mientras que los sistemas regionales son sistemas cíclicos y la energía se acumula dentro de los canales de flujo (Maciel Flores & Rosas Elguera, 1992).

1.4.1 Tipos de sistemas geotérmicos

1.4.1.1 Sistemas Hidrotermales

Están constituidos por una fuente de calor, agua (líquido y/o vapor) y la roca donde se almacena el fluido (Figura 6). Pueden clasificarse en tres tipos principales: vapor dominante, líquido dominante de alta entalpía y líquido dominante de baja entalpía.

- **Vapor dominante:** Son sistemas de alta entalpía, generalmente de vapor seco.
- **Líquido dominante de alta entalpía:** Conocidos como sistemas de salmuera súper caliente, con temperaturas entre 200 °C y más de 300 °C (Arellano Gómez, Iglesias Rodríguez, & García Gutiérrez, 2008).
- **Líquido dominante de baja entalpía:** Estos sistemas producen recursos de baja y mediana temperatura (20°C a 150 °C) debido a su flujo de calor y a la baja conductividad térmica (Santoyo Gutiérrez & Torres Alvarado, 2010).

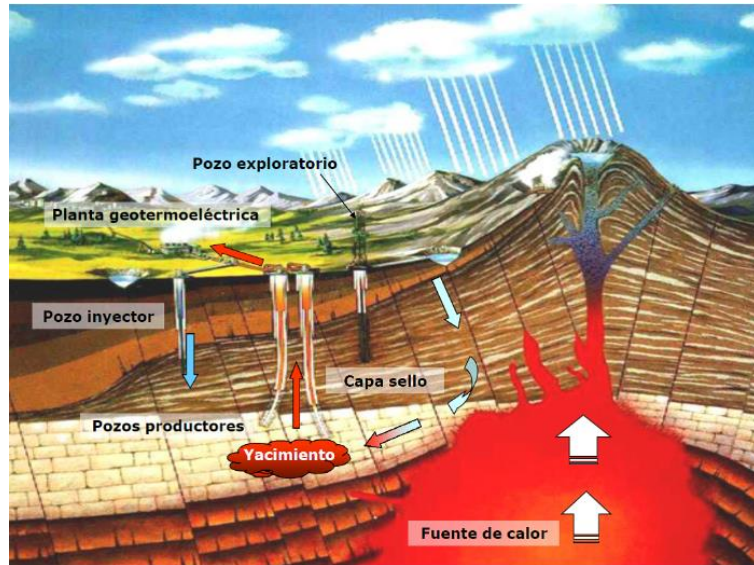


Figura.- 6 Modelo esquemático de un sistema geotérmico de tipo hidrotermal (Pagán Santini & Rappo Miguez, 2015).

1.4.1.2 Sistemas Geotérmicos mejorados

También conocidos como Sistemas de Roca Seca Caliente, son sistemas rocosos con alto contenido energético, pero con poca o nada de agua (baja permeabilidad). Este recurso geotérmico se encuentra en el subsuelo entre 2 Km y 4 Km de profundidad, con una temperatura necesaria para la generación de electricidad (150 °C->200 °C), además se considera como uno de los más abundantes del mundo y es prácticamente inagotable.

1.4.1.3 Sistemas Geopresurizados

Son sistemas que contienen agua y metano disuelto a alta presión (del orden de 700 bar) y mediana temperatura (aproximadamente 150 °C). No se han explotado comercialmente en la actualidad.

1.4.1.4 Sistemas Marinos

Son sistemas de alta entalpía existentes en el fondo del mar, actualmente no se explotan comercialmente y hasta ahora han sido poco estudiados.

1.4.1.5 Sistemas Magmáticos

Son sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos o a gran profundidad, en zonas de debilidad cortical. En la actualidad no se explotan

comercialmente. Posiblemente el atractivo más importante de este tipo de recurso sean las altísimas temperaturas disponibles ($\geq 800^{\circ}\text{C}$) (Arellano Gómez, Iglesias Rodríguez, & García Gutiérrez, 2008).

1.5. Estudios previos

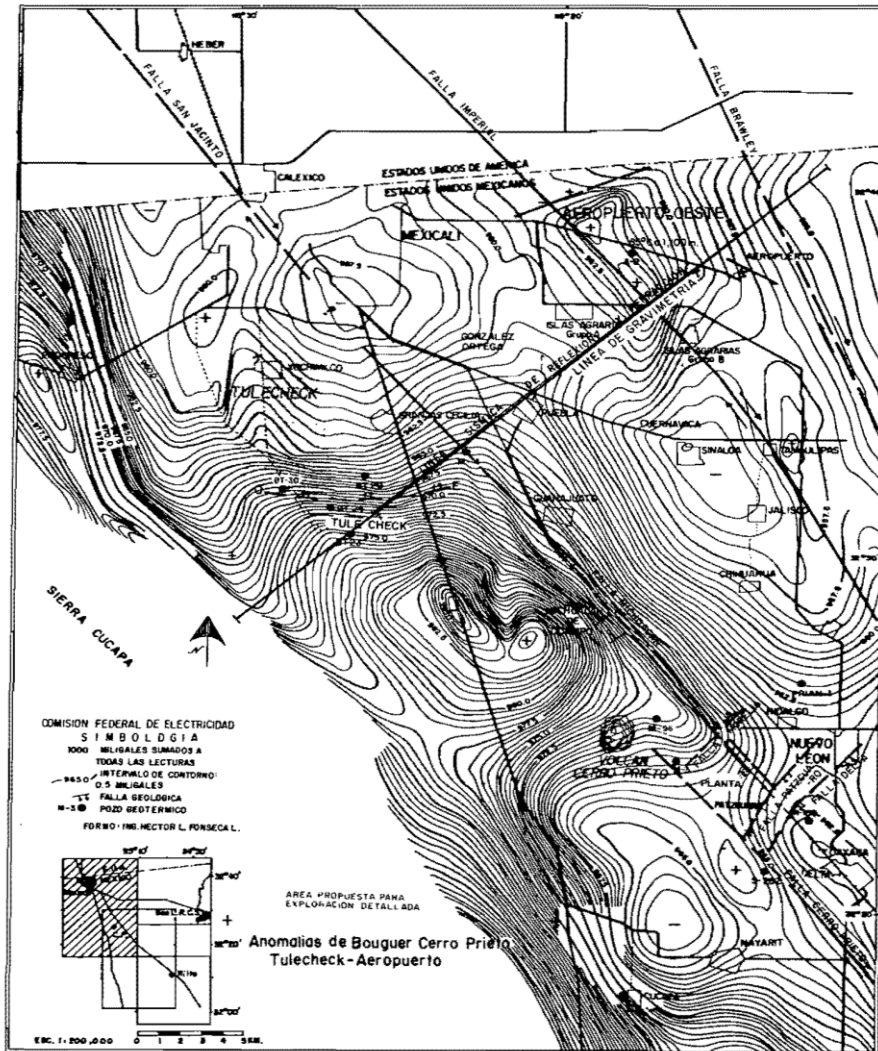
Con base en la importancia que tiene Baja California por sus condiciones geológicas-estructurales, se han realizado diversos trabajos con el objetivo de encontrar nuevos sitios con posibilidades geotérmicas, por lo que se han llevado a cabo estudios de prospección con diferentes métodos geofísicos con el fin de caracterizar y potencializar las zonas de interés.

1.5.1 Gravimetría

El trabajo realizado por Fonseca, Peña, Puentes y Díaz consiste en exponer las condiciones geológicas-estructurales propicias para el desarrollo geotérmico, incluyendo la posible extensión del Campo geotérmico de Cerro Prieto de la región del Valle de Mexicali, relacionando ciertas anomalías geofísicas. Dichos autores Interpretaron algunas áreas de interés como prospectos geotérmicos las cuales fueron: el Campo Cerro Prieto, Tulecheck, Riito, Aeropuerto-Algodones y San Luis Río Colorado.

Al no contar con datos digitales de gravimetría se tomó el mapa de la Anomalía de Bouguer de la región Tulecheck-Aeropuerto (Figura 7) para el desarrollo del presente trabajo y así poder digitalizar y extraer los datos de la región.

También se utilizaron datos de anomalía de Bouguer de un informe de levantamiento gravimétrico de la zona geotérmica de Mexicali Baja California, elaborado por Juan Velasco Hernández. Este levantamiento gravimétrico tuvo como objetivo la obtención de datos para la caracterización estructural del subsuelo de la zona.



XBL 823-8785

Figura.- 7 Mapa de las Anomalías de Bouguer de la región Tulecheck-Aeropuerto (Fonseca, Díaz, C, Puente, & de la Peña).

Además se utilizaron de referencia modelos regionales 2.5D de la tesis *Crustal Structure of the Salton Trough: Constraints from Gravity Modeling* por Uchenna Ikediobi, localizados en parte norte del área de estudio, cuyo objetivo fue modelar la estructura de la corteza de la zona Fosa Salton Trough utilizando datos gravimétricos y geológicos; también se tomo en cuenta el modelo hecho por Hussein (Figura 8). Hussein concluyó que la variación de densidad entre la corteza superior e inferior sugiere magmatismo en la corteza inferior y sedimentación en la corteza superior.

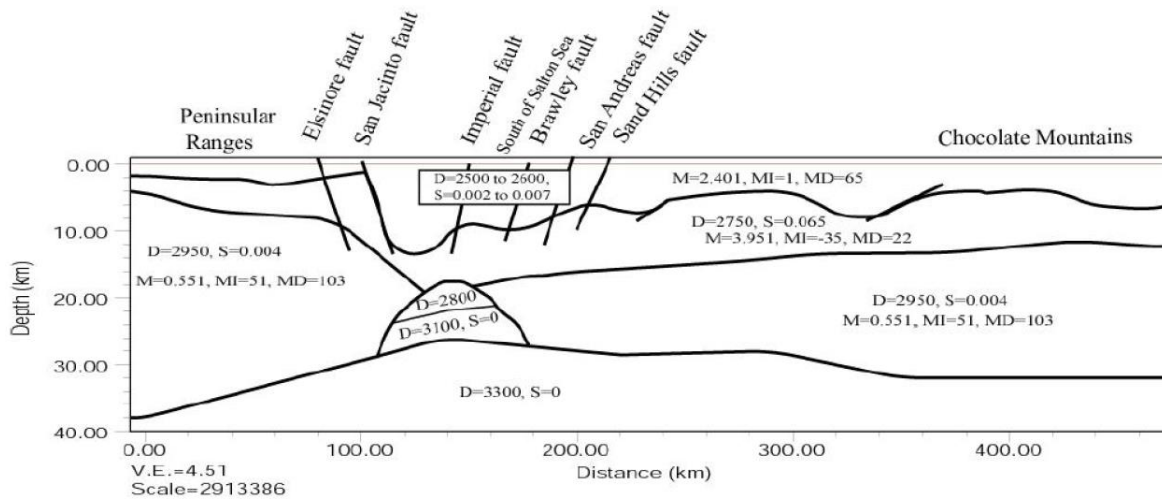


Figura.- 8 Modelo gravimétrico de Hussein et al. (2007) sobre el perfil que cruza el centro de la región Salton Trough. Se interpreta un cuerpo gabroico debajo de Salton Trough. D= densidad (Kg/m³), S= susceptibilidad, M= magnetización (A/m), MI= Inclinación magnética (grados), MD= declinación magnética (grados) (Ikediobi, 2013).

Con base en toda esta información, Uchenna Ikediobi propuso los siguientes perfiles para el desarrollo de los modelos 2.5D (Figura 9).

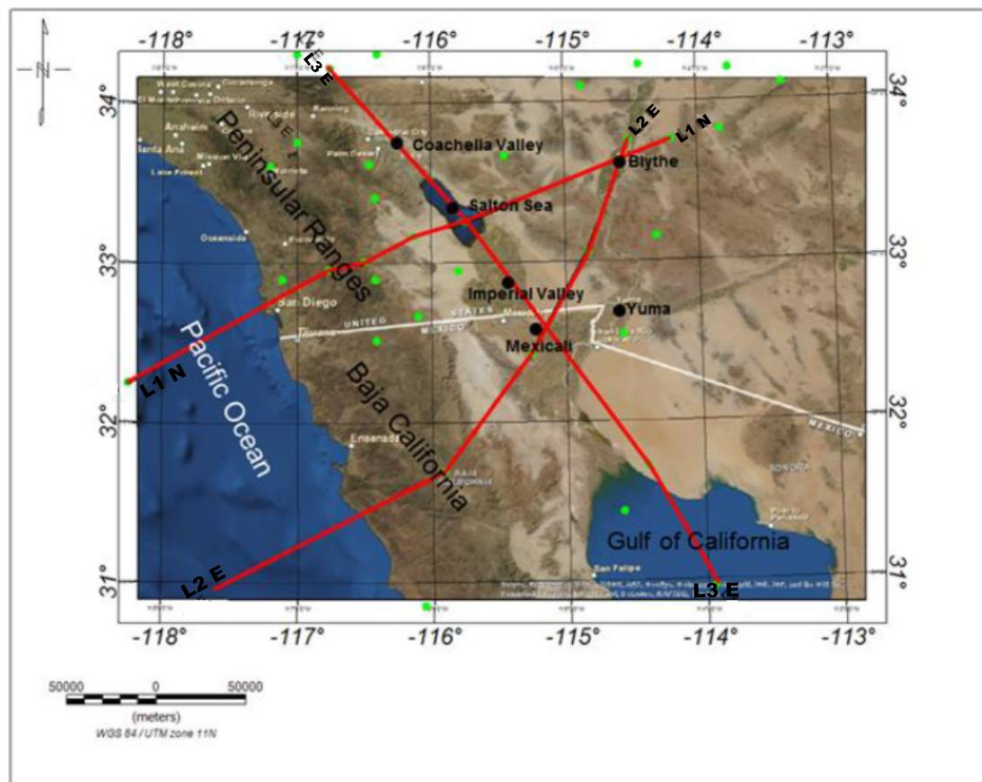


Figura.- 9 Perfiles (Líneas rojas) para modelos gravimétricos que cruzan el área de estudio. Pozos (Puntos verdes para restringir el modelo) (Ikediobi, 2013).

Para el presente trabajo, se tomo de referencia el modelo del perfil L2E (Figura 10) por la cercanía a la zona de estudio (Figura 9).

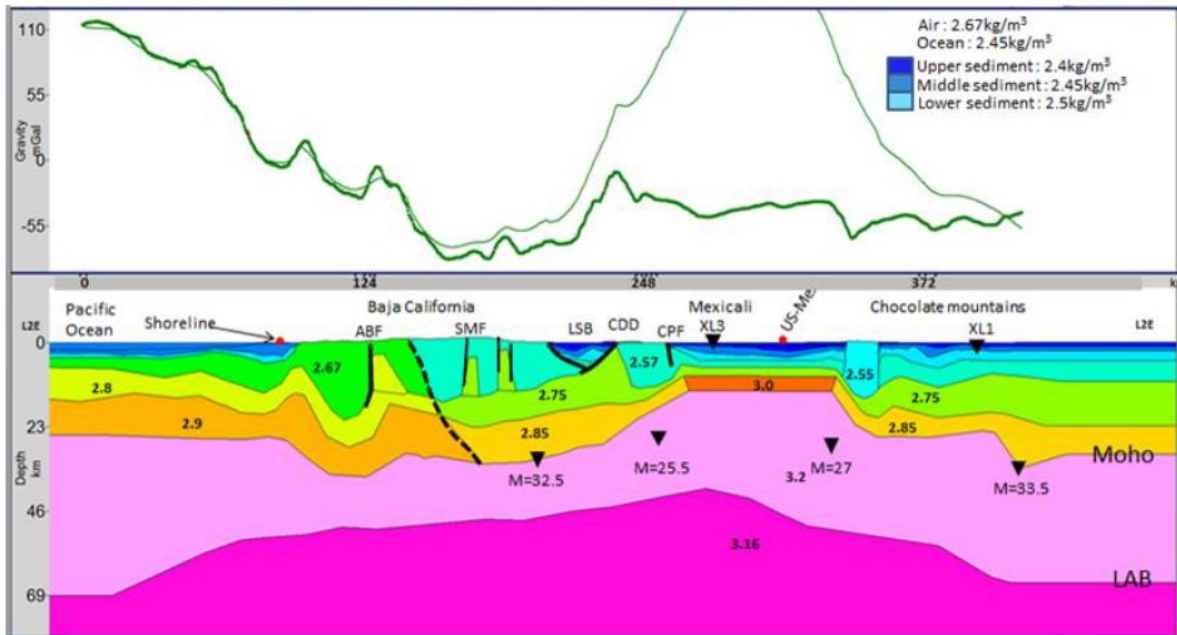


Figura.- 10 Modelo del perfil L2E de la corteza oceánica. LBS =Cuenca Laguna Salada, CDD= Canadá David Detachment, LAB= Límite de la astenosfera-litosfera y CPF= Falla Cerro Prieto (Ikediobi, 2013).

1.5.2 Sísmica

Se conto con información preliminar de estudios de sísmica de reflexión del trabajo realizado por Fonseca, Peña, Puentes y Díaz, para conocer el ambiente estructural de uno de los perfiles propuesto para modelar (Figura 11). El horizonte UA pertenece a la unidad de sedimentos no consolidados (limos, arcillas, conglomerados etc.) y el horizonte UB a la unidad de sedimentos consolidados (lutitas e intercalaciones de areniscas).

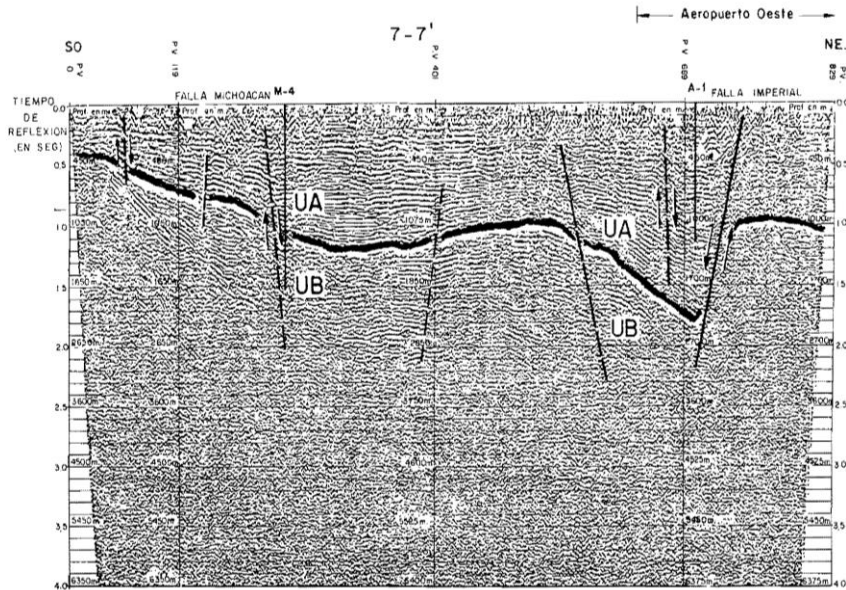


Figura.- 11 Línea sísmica de reflexión mostrando el ambiente estratigráfico del área de Aeropuerto Oeste (Fonseca, Díaz, C, Puente, & de la Peña).

1.5.3 Sistema Geotérmico y pozos

Para el sistema Geotérmico se tomo como referencia la actualización del modelo geológico conceptual del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California por Héctor Lira Herrera (Figura 12) donde se obtuvo información de la perforación de 11 pozos (Figura 12) que permitieron definir cinco unidades litológicas: basamento, lutita gris, lutita café, lodolitas y sedimentos clásticos no consolidados.

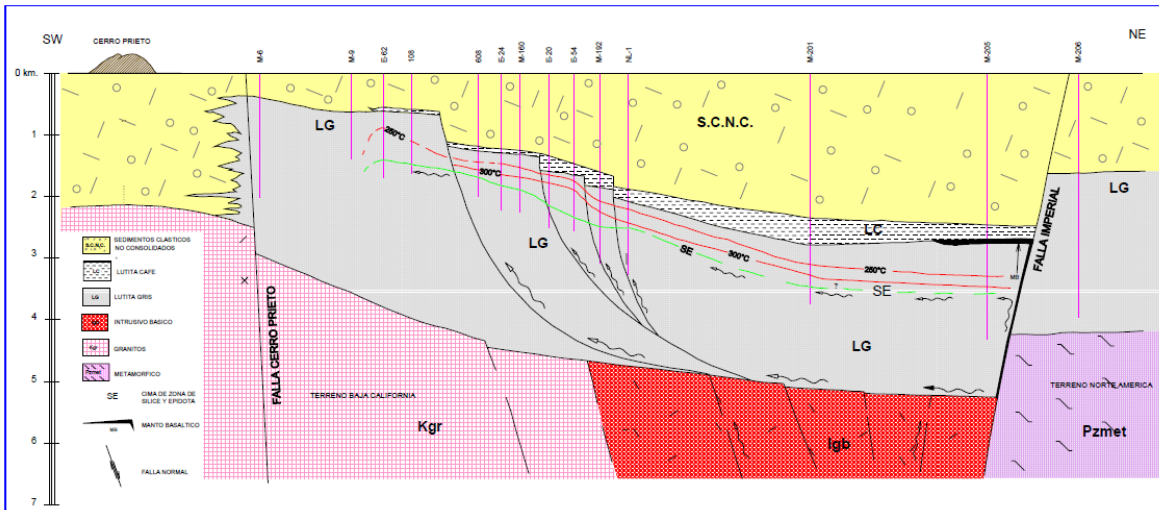


Figura.- 12 Sección geológica general (Lira Herrera, 2005).

Por otra parte Puente y Peña definieron tres unidades Litológicas (Figura 13):

- **Unidad Litológica A:** Compuesta por sedimentos continentales no consolidados y semiconsolidados, a los que se les han asignado la edad Cuaternaria, integrada por arcillas, limos, arenas y gravas.
- **Unidad Litológica B:** Está formada por sedimentos deltaicos consolidados del tipo continental de edad Terciaria, está integrada por una alternancia de lutitas, limolitas y areniscas. Las lutitas y limolitas van de color gris claro a oscuro, ocasionalmente negras y en partes metamorfizadas. Las areniscas son de color gris claro, de grano fino bien seleccionado siempre variado entre grauvaca, arcosa y ocasionalmente a cuarcita. Esta Unidad contiene entre sus horizontes permeables a los acuíferos de alta temperatura, considerando que las zonas fracturadas son los conductos principales por los cuales emigran los fluidos de agua caliente.
- **Unidad Litológica C:** Se le ha denominado basamento granítico y metasedimentario del Cretácico Superior, estando presente en superficie. Esta unidad forma parte del batolito.

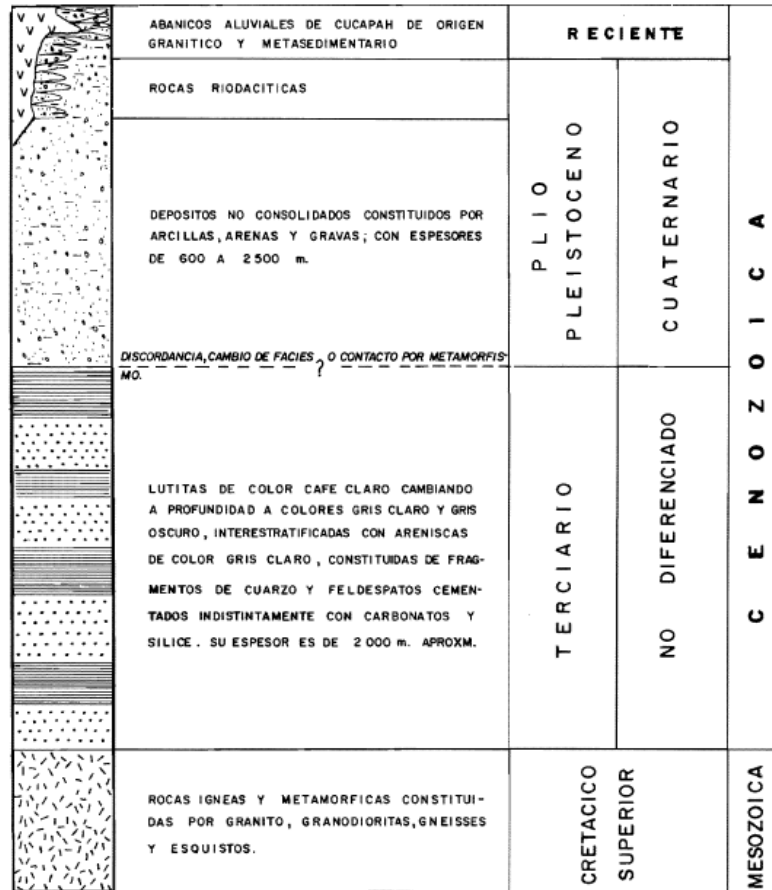


Figura.- 13 Columna estratigráfica generalizada del área de Cerro Prieto (Puente C. & de la Peña L., 1978).

La información del Pozo M-3 del informe escrito por Espinoza y Mooser fue de utilidad para conocer los espesores en el área de Cerro Prieto. Se encontró material aluvial formado por arenas finas y medianas con intercalaciones delgadas de arcillas en los primeros 1000 metros, como iba avanzando la perforación los depósitos estaban más compactados y cementados hasta llegar a los 2,532 metros donde se encontró el basamento granítico, finalizando la perforación hasta los 2,629 metros. Otros pozos utilizados para este trabajo fueron el pozo A-1 y M4, localizados sobre el perfil de sísmica de reflexión (Figura 11).

Finalmente con toda esta información base para el desarrollo de este trabajo, se tomo el modelo conceptual del sistema geotérmico del Campo Cerro Prieto (Figura 14) de Lira Herrera, ya que los eventos geológicos e información son muy similares a la zona de estudio.

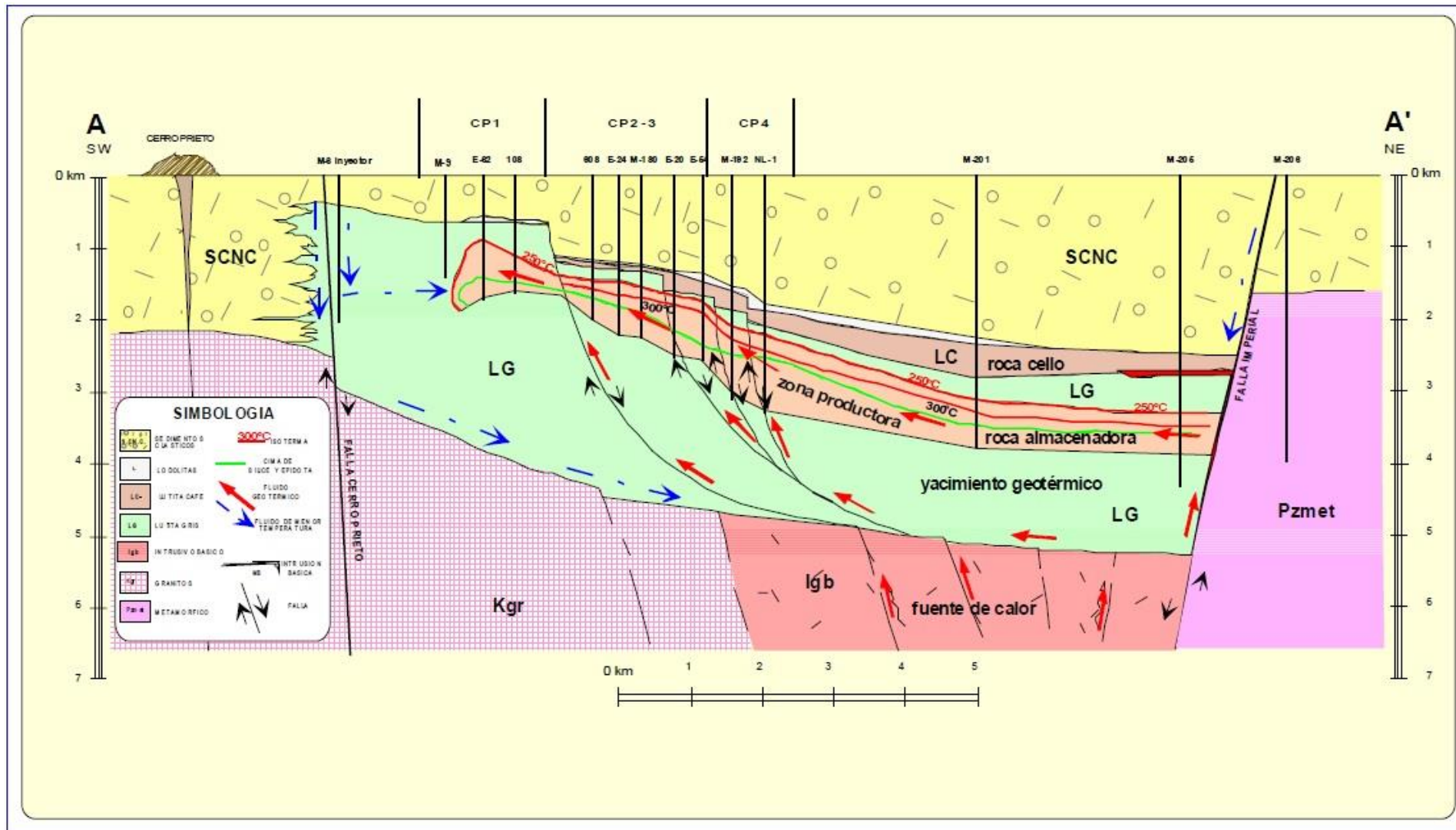


Figura.- 14 Modelo Conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto (Lira Herrera, 2005).

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se describen los métodos geofísicos aplicados en el desarrollo del presente trabajo de tesis. Primero se describe el método magnético, el cual es el punto de partida para caracterizar lineamientos magnéticos, fallas, fracturas y la profundidad de las fuentes magnéticas. Posteriormente se describen los gravimétricos para determinar estructuras y las respectivas densidades en la zona de estudio (Mexicali-Algodones, Baja California).

2.1 Magnetometría

La prospección magnética es el método geofísico de exploración más antiguo, fue utilizado principalmente para la búsqueda de petróleo, minerales y vestigios arqueológicos, posteriormente fue usado en la exploración geotérmica. En la prospección geotérmica este método contribuye a la determinación de la profundidad del basamento magnético (rocas ígneas), delimita fuentes magnéticas intrasedimentarias, tales como volcanes poco profundos o cuerpos intrusivos que interrumpen las secuencias sedimentarias, identifica zonas de fallas, cizallamiento y fracturas, ubica ambientes favorables para la búsqueda de zonas con potencial geotérmico. Esto se debe a la medición u observación de las variaciones del campo magnético terrestre atribuibles a cuerpos anómalos, los cuales están conformados por rocas que tienen un contenido mineralógico ferromagnético capaz de producir anomalías magnéticas significativas.

El levantamiento de datos magnéticos puede ser adquirido por vía terrestre, aérea y marina, actualmente la técnica más empleada por la velocidad y costos de operación es por vía aérea (Magnetic surveying, 2002).

2.1.2 Fundamento Físico

Un campo es una unidad de carga magnética en un medio, cuando se cargan dos unidades o dos polos magnéticos de misma u opuesta polaridad, se acercan entre sí, experimentando cierta fuerza que actúa entre ellas dando origen a un campo de fuerzas (Roy Kumar, 2008). Así que un campo magnético es creado cuando una carga eléctrica es rodeada por un campo eléctrico que actúa y produce una fuerza

(F) sobre cualquier otra carga en movimiento siguiendo un patrón lineal; en cualquier punto del campo, la dirección de la fuerza es tangencial a la línea de campo y la fuerza de intensidad es proporcional al número de líneas de campo por unidad de área transversal (Lowrie, 2007).

Coulomb estableció que la fuerza generada entre los extremos de los imanes (Figura 15) era inversamente proporcional al cuadrado de su separación, posteriormente Gauss amplió estas observaciones atribuyendo las fuerzas de atracción y repulsión a las cargas magnéticas quedando como ley, que la fuerza (F) entre dos cargas q_1 y q_2 será proporcional al cuadrado de su separación (Ec. 2.1.1), formulada como:

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \dots\dots\dots (2.1.1)$$

Donde K es la constante de proporcionalidad, Esta constante está dada por $\frac{1}{4\pi\mu}$, (μ) es denominada como la permeabilidad magnética que es igual a $4\pi \times 10^{-7}$ henry/ metros.



Figura.- 15 Fuerza de atracción entre una carga positiva y una carga negativa desplazadas a una distancia (r) (modificado) (Roy Kumar, 2008).

La fuerza de campo magnético en un punto es definido como la fuerza por unidad del polo que puede ser ejercida sobre un pequeño polo de fuerza (P_0) si es desplazado a ese punto. Por lo tanto, la fuerza del campo (H) debido a polo de fuerza (P), a una distancia (r) (Ec. 2.1.2) es:

$$H = \frac{F}{P_0} = \frac{P}{\mu r^2} \dots\dots\dots (2.1.2)$$

Los polos magnéticos siempre se manifiestan en la naturaleza como un dipolo magnético, estos dos polos de fuerza (m) están separados por una distancia (l) por lo que tendrán un momento dipolar (Ec. 2.1.3) definido como:

$$\vec{P} = ml\vec{r} \dots\dots\dots (2.1.3)$$

El momento dipolar es un vector unitario (r) que está orientado en dirección a la línea que une al polo negativo al positivo (Roy Kumar, 2008).

Un cuerpo magnético experimenta una fuerza cuando se desplaza en un campo magnético. La intensidad de magnetización es proporcional a la dirección dirigida a lo largo del campo externo, por lo tanto la intensidad de magnetización es el momento magnético por unidad de volumen (Ec. 2.1.4) quedando como:

$$I = \frac{\vec{P}}{v} F \dots\dots\dots (2.1.4)$$

Donde v es el volumen del cuerpo magnético (Roy Kumar, 2008).

2.1.3 Permeabilidad y Susceptibilidad magnética

Los materiales pueden adquirir propiedades magnéticas en presencia de un campo magnético, este magnetismo en rocas, minerales o en cuerpos metálicos (Roy Kumar, 2008) es proporcional en magnitud y es paralela o antiparalela en dirección al campo externo. La intensidad de magnetización es el momento de inducción magnética por unidad de volumen (Ec. 2.1.5) y es dada por:

$$M = KH \dots\dots\dots (2.1.5)$$

La constante de proporcionalidad K es llamada susceptibilidad magnética, sin embargo la intensidad de magnetización tiene relación directa con la susceptibilidad de las rocas (Figura 17) (Milsom, 2003).

2.1.3.1 Tipos de magnetización

- Diamagnetismo: es una propiedad inherente de todos los materiales, es una perturbación del movimiento orbital de los electrones en el campo magnético, de tal manera que induce una pequeña magnetización en el sentido opuesto al campo aplicado, por lo que la susceptibilidad magnética es negativa (Figura 16 a).
- Paramagnetismo: es una propiedad de los sólidos que tienen momentos magnéticos atómicos. La aplicación de un campo magnético causa que los

momentos atómicos se alineen parcialmente de forma paralela al campo aplicado, lo que produce una magnetización neta en dirección al campo aplicado (Figura 16 b). Los efectos térmicos tienden a oponerse a esta alineación, el paramagnetismo se desvanece en ausencia de campos aplicados, ya que los efectos térmicos actúan en dirección aleatoria a los momentos atómicos.

- Ferromagnético: los materiales con esta propiedad muestran fuerte efecto de magnetización, muestran una alta susceptibilidad magnética positiva, los electrones se alinean rápidamente en dirección al campo magnético externo (Figura 16 c) (Roy Kumar, 2008), su eficiencia está afectada por la agitación térmica que incrementa el desorden desviando los momentos magnéticos de spin. Normalmente la energía térmica es mucho mayor que la energía magnética y por eso en ausencia del campo magnético externo los spines se orientan de forma aleatoria.

Los materiales ferromagnéticos son dependientes de la temperatura, cuando se calienta sus propiedades ferromagnéticas desaparecen al alcanzar la temperatura de Curie (T_C), esta temperatura es distintiva de cada material (Villalaín Santamaría, 2016).

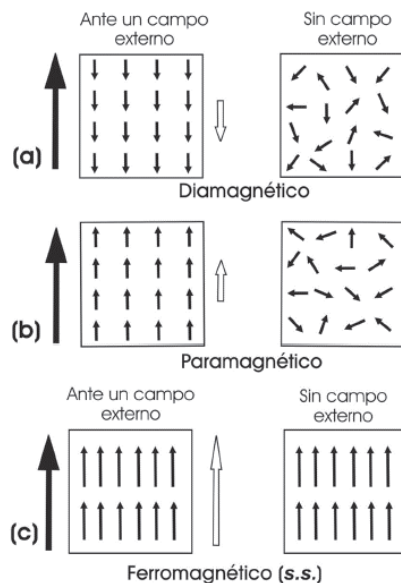


Figura.- 16 Diferentes tipos de comportamiento magnético (Caballero Miranda, 2011).

Tipo de roca	Susceptibilidad $\times 10^3$	
	Rango	Promedio
Sedimentarias		
Dolomita	0-0.9	0.1
Caliza	0-3	0.3
Arenisca	0-20	0.4
Lutita	0.01-15	0.6
Metamórficas		
Anfibolita		0.7
Esquisto	0.3-3	1.4
Filita		1.5
Gneiss	0.1-25	
Cuarzita		4
Serpentina	3.0-17	
Pizarra	0-35	6
Ígneas		
Granito	0-50	2.5
Riolita	0.2-35	
Diabasa de olivino		25
Dolorita	1.0-35	17
Augie-sienita	30-40	
Diabasa	1-160	55
Pórfido	0.3-200	60
Gabro	1.0-90	70
Basalto	0.2-175	70
Diorita	0.6-120	85
Piroxenita		125
Periodita	90-200	150
Andesita		160

Tipo de roca	Susceptibilidad $\times 10^3$	
	Rango	Promedio
Minerales		
Grafito		0.1
Cuarzo		-0.01
Sal	0-0.001	
Anhidrita, yeso		-0.01
Calcita		
Carbón		0.02
Arcillas		0.2
Calcopirita		0.4
Esfarelita		0.7
Casiterita		0.9
Siderita	1-4.0	
Pirita	0.05-5	1.5
Limolita		2.5
Arsenopirita		3
Hematita	0.5-35	6.5
Cromita	3-110	7
Franklinita		430
Pirotita	1.0-6000	1500
Ilmenita	300-3500	1800
Magnetita	1200-19200	6000

Figura.- 17 Tabla de susceptibilidades magnéticas de las rocas y minerales (Telford, Geldart, & Sheriff, 1990).

2.1.4 Geomagnetismo

El campo magnético terrestre (B) es un vector, asimismo tiene magnitud y dirección. La magnitud o intensidad total de campo (F) es el módulo del vector (B), donde (B) es la componente del campo magnético, dicho módulo equivale al vector resultante de la suma vectorial de tres componentes cartesianas, (X , Y , Z). Tomándose como referencia para su estudio un punto en la superficie, el campo geomagnético terrestre tiene una componente (H) que es la componente horizontal y una componente vertical (Z), en dirección al norte magnético; estos elementos pueden ser expresados en coordenadas geográficas. La magnitud del vector magnético es

dada por la fuerza del campo (F); su dirección es especificada por dos direcciones; la declinación (D) que es el ángulo entre el meridiano magnético y el meridiano geográfico y la inclinación el cuál es el ángulo entre el vector magnético y la horizontal (Figura 18) (Lowrie, 2007).

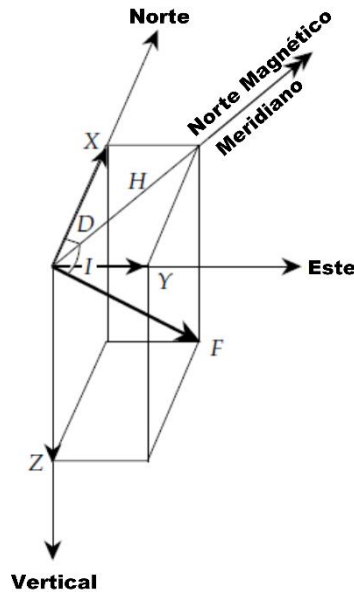


Figura.- 18 Elementos del campo geomagnético terrestre (Lowrie, 2007).

2.1.5 Correcciones

2.1.5.1 Variación Diurna

Las variaciones diurnas son pequeñas oscilaciones del campo terrestre, las cuales tienen una periodicidad de un día y una amplitud promedio de 25 gammas; son generadas por los cambios de fase y amplitud dependiendo de la localización geográfica, aunque también puede tener influencia las condiciones geológicas (susceptibilidad de las rocas).

Generalmente se registran dos tipos de variaciones: las de los días tranquilos que muestran una variación regular y una baja amplitud y las de días con perturbación que son menos regulares, estas últimas son asociados a tormentas magnéticas debidas a una fuerte actividad solar (Dobrin & Savit, 1988).

La corrección por variación diurna es muy complicada, ya que diariamente la variación del campo magnético terrestre es altamente cambiante por lo que no es fácil hacer una aproximación por un modelo matemático.

2.1.5.2 Tormentas magnéticas

Estas tormentas son perturbaciones transitorias del campo magnético producidas por el sol (Figura 19), presentan oscilaciones rápidas e impredecibles que no son posibles de corregir como la variación diurna anteriormente mencionada por consecuente suelen causar interrupciones en las operaciones de prospección magnética (Dobrin & Savit, 1988).

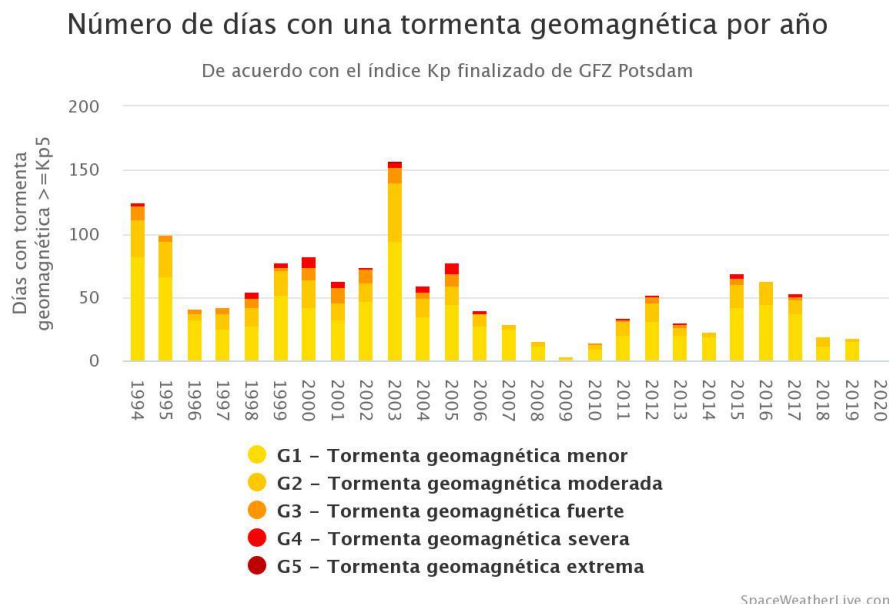


Figura.- 19 Gráfica de número de días con una tormenta geomagnética por año (Space Weather Prediction Center, 2020).

2.1.5.3 Variación secular

Estas variaciones son un conjunto de oscilaciones de las anomalías del campo terrestre en dirección Este-Oeste, las cuales se toman en un lugar progresivamente a través de décadas o siglos. Se consideran los valores de las magnitudes magnéticas determinadas en los observatorios, aplicando procedimientos de cálculo de la teoría de Gauss, sobre el magnetismo (Siñeriz, 1928).

2.1.5.4 Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF siglas en inglés)

Las variaciones del campo terrestre de acuerdo a la latitud, longitud y tiempo son descritos por una serie de modelos matemáticos mejor conocido como: IGRF (Campo geomagnético internacional de referencia); definido por 120 coeficientes harmónicos esféricos en un orden $N=10$, complementado con un modelo de variación secular predictiva de orden $N=8$. Los IGRFs proporcionan representaciones razonables de los campos regionales reales, donde pueden usarse para calcular correcciones regionales con discrepancias de hasta 250 nT, estas extrapolaciones del IGRF se actualizan cada 5 años, para dar un modelo definitivo (DGRF) (Figura 20) (Milsom, 2003).

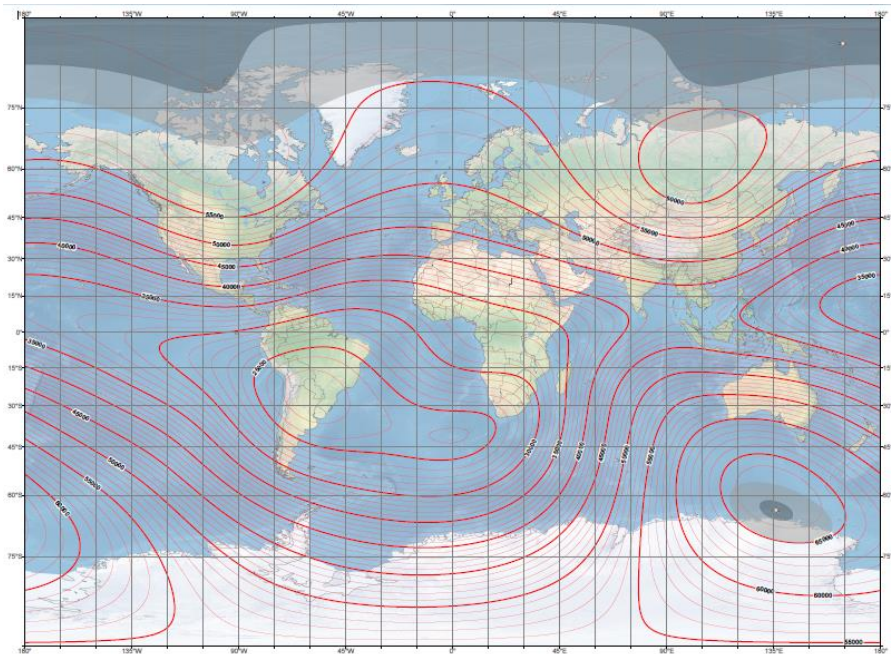


Figura.- 20 Modelo Magnético Mundial-Intensidad Total del Campo Principal (F) (NOAA, 2019).

2.1.6 Anomalía Magnética

Las anomalías magnéticas son causadas por rocas sobrepuestas en el campo magnético que genera variaciones que no solo afecta a la amplitud sino también a la dirección. Una anomalía magnética sobrepuesta causa un cambio ΔB en la fuerza del campo total del vector (B), permitiendo que la anomalía produzca una

componente vertical (ΔZ) y una componente (ΔH) en un ángulo (α) con respecto a (H); donde (B) es la inducción magnética y (H) el campo magnético (Figura 21) (Magnetic surveying, 2002).

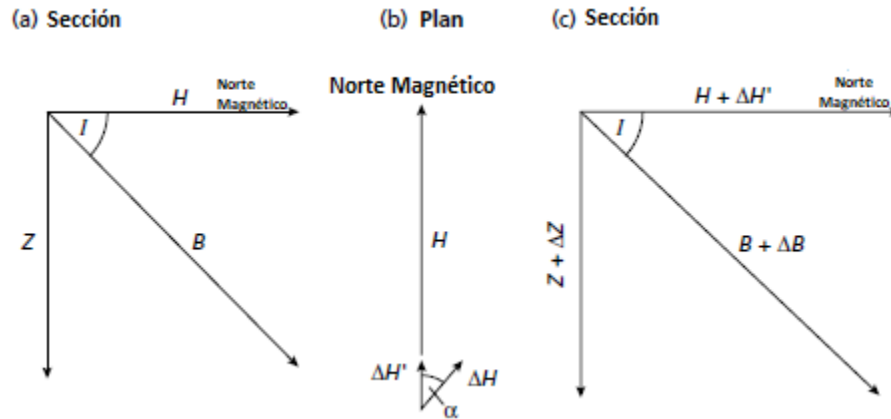


Figura.- 21 Representación vectorial del campo geomagnético con y sin una anomalía magnética sobrepuesta. Donde B = Inducción Magnética, H = Campo Magnético, Z = Componente Vertical y I =Inclinación (Magnetic surveying, 2002).

2.2 Gravimetría

El método Gravimétrico, ofrece una amplia gama de aplicaciones en la exploración geotérmica y es particularmente eficaz en los estudios de reconocimiento regional a bajo costo (PEMEX & IMP).

La aplicación del método de prospección gravimétrica tiene como finalidad la investigación de la geología del subsuelo con base en la observación de las variaciones del campo gravitacional de la tierra, derivado de las diferencias o contrastes horizontales de las densidades de las rocas y formaciones. Apoya en la definición de la morfología de las cuencas, identifica la expansión lateral y la tendencia de las estructuras sedimentarias, así como también en la localización de fallas en el subsuelo.

Este método está fundamentado por la ley de gravitación universal de Newton:

2.2.1 Fundamento Físico

En 1687, Newton publicó La ley de Gravitación Universal que establece que cada partícula de materia tiene un campo gravitacional, este campo se manifiesta con

una fuerza de atracción (F) entre todas y es directamente proporcional a estas masas (m_1, m_2) y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación (r^2), está dada por la siguiente ecuación (Ec. 2.2.1), donde el campo gravitacional ejerce una fuerza en una partícula de masa (m) en un punto de observación, por lo que se genera una intensidad de campo en ese punto, dado que es una magnitud vectorial dirigida desde el punto de observación de una partícula de masa (m_0) en $P = (x, y, z)$ a un punto interior de la distribución de la masa centrada, $Q = (X', Y', Z')$, (Figura 22).

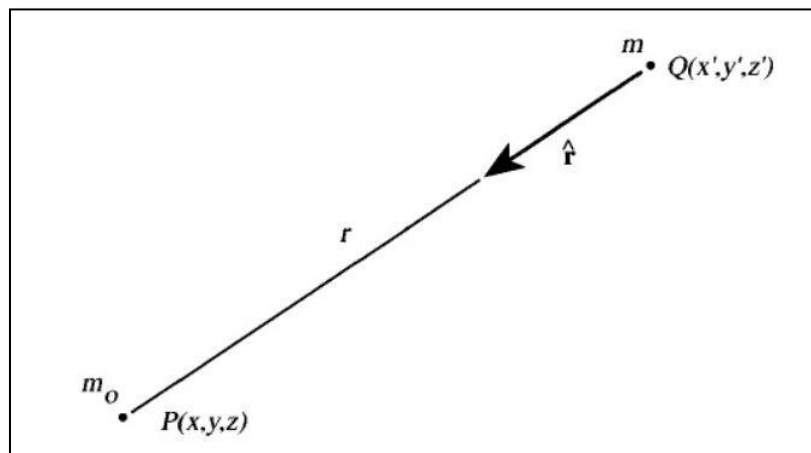


Figura.- 22 La masas m y m_0 experimentan una misma fuerza gravitacional la cual es proporcional a m , m_0 , y r^{-2} . Por convención, el vector unitario \hat{r} se dirige desde la fuente gravitacional hasta el punto de observación, el cual en este caso se localiza en una masa de prueba m_0 (Blakely, 1996).

$$F = G \frac{mm_0}{r^2}, \dots\dots\dots (2.2.1)$$

Dónde

$$r = [(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.2.2)$$

G está definida como la constante gravitacional ($6.66 \times 10^{-11} m^3 Kg^{-1} s^{-2}$) propuesta por Lord Cavendish que determinó este valor experimentando en su laboratorio, haciendo mediciones de la fuerza de atracción entre dos esferas de plomo colocadas a cierta distancia precisa (Dobrin & Savit, 1988).

Considerando la atracción gravitacional de una tierra esférica homogénea, descrita como un campo no rotacional de masa (M) y radio (R) con una pequeña masa en su superficie (Ec. 2.2.3), es relativamente fácil de mostrar que la masa de la esfera actúa como si estuviera concentrada en el centro:

$$F = \frac{GM}{R^2} m = mg, \dots \dots \dots (2.2.3)$$

La fuerza está relacionada a una masa por una aceleración y el término $g=GM/R^2$ que es conocido como la aceleración gravitacional o simplemente gravedad, el peso de la masa es dado por (mg).

En una tierra homogénea, la gravedad podría ser una constante, sin embargo la tierra tiene una forma elipsoidal, rotación, un relieve irregular y una distribución de masa interna que causa una variación de gravedad sobre esa superficie.

Por lo tanto en el teorema de Helmholtz considera que la aceleración gravitacional es un campo conservativo que usualmente es representado como un gradiente potencial escalar (Ec. 2.2.4):

$$g(P) = \nabla U(P) \dots \dots \dots (2.2.4)$$

Dónde

$$U(P) = \frac{GM}{r} \dots \dots \dots (2.2.5)$$

La función (U) es llamada potencial gravitacional o potencial Newtoniano y la aceleración g es un campo potencial.

El valor de la fuerza de gravedad sobre la superficie de la tierra es de 9.8 m/s^2 . Las variaciones en la gravedad son causadas por variaciones de densidades en la subsuperficie. Galileo midió por primera vez la aceleración debida a la Gravedad, dejando caer desde la Torre de Pisa un objeto, el valor de “g” fue de 980 cm/s^2 y en honor a Galileo, la unidad de aceleración debida a la gravedad se denominó “Gal” (Roy Kumar, 2008).

2.2.2 Anomalías Gravimétricas

Los gravímetros responden solo a la componente vertical. Considerando el efecto gravitacional de una masa anómala (δg) con componentes verticales y horizontales

δg_x y δg_z respectivamente del campo gravitatorio local (g) como se muestra en el siguiente diagrama (Figura 23) (Kearey, Brooks, & Hill, 2002):

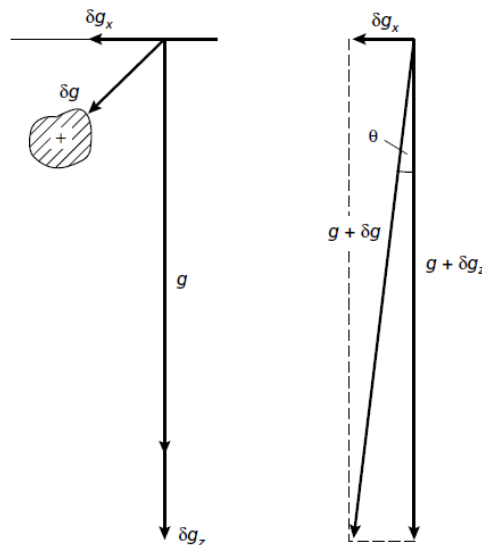


Figura.- 23 Relación entre el campo gravitacional y las componentes de la anomalía gravimétrica de una masa pequeña (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).

Solucionando el rectángulo de fuerzas (Ec. 2.2.6), quedando las siguientes expresiones:

$$g + \delta g = \sqrt{((g + \delta g_z)^2 + \delta g_x^2)} \dots\dots\dots (2.2.6)$$

$$= \sqrt{(g^2 + 2g\delta g_z + \delta g_z^2 + \delta g_x^2)} \dots\dots\dots (2.2.7)$$

Como los términos g^2 son insignificantes se discriminan quedando la expresión (Ec. 2.2.8) de la siguiente forma:

$$g + \delta g \approx g\delta g_z \dots\dots\dots (2.2.8)$$

Dado que una anomalía gravimétrica es parte de la medición que se desvía de una medición promedio sobre la superficie terrestre, se considera la suma del efecto de un esferoide que rota 24 horas. La latitud más cercana al ecuador arrojará un efecto gravimétrico menor; sin embargo si el gravímetro se coloca en un sitio con cierta elevación, se aleja del centro de la tierra (aire libre), así que se debe corregir por estar elevado con respecto al esferoide y posteriormente se le agrega la masa de la

elevación (topografía del lugar) con una losa, pero el exceso de esta losa se elimina con la corrección topográfica. Así como este efecto hay otras variaciones que se deben de quitar a la serie de valores obtenidos llamados correcciones.

2.2.3 Correcciones Gravimétricas

2.2.3.1 Corrección por deriva

Esta corrección de deriva del instrumento tiene su fundamento en una serie de repeticiones de lecturas en una estación base (de primer orden) en un lapso de tiempo ya que a lo largo del día el gravímetro al estar posicionado en el mismo lugar provoca variaciones en las lecturas por el estiramiento del resorte o efectos de marea, esta lectura se gráfica contra tiempo el cual muestra un comportamiento lineal (Figura 24).

Después de la corrección por deriva la diferencia entre la gravedad en un punto observado y la gravedad base es encontrada por la multiplicación de la diferencia en metros de las lecturas por el factor de calibración del gravímetro; conociendo esta diferencia en la gravedad, la gravedad absoluta en los puntos observados se puede calcular a partir del valor conocido de la gravedad base (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).

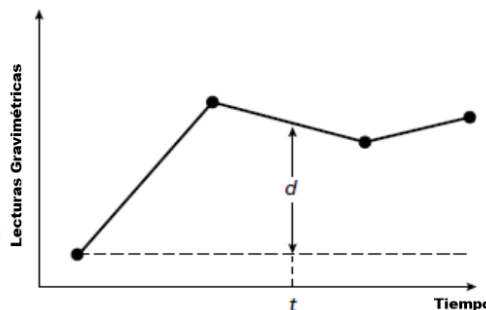


Figura.- 24 Curva de deriva gravimétrica construida a partir de lecturas repetidas de un lugar fijo (Kearey, Brooks, & Hill, *An Introduction to Geophysical Exploration*, 2002).

2.2.3.2 Corrección por marea

Cuando se hacen una serie de mediciones gravimétricas en un sitio fijo estas lecturas tendrán variaciones debido a los efectos asociados con los movimientos

orbitales del sol y la luna, así que la corrección que se hace debe ser con alta precisión. Estos efectos hacen que la forma de la tierra varíe de la misma manera causando las llamadas “mareas sólidas”, ocasionando que la elevación de un punto de observación se vea alterado por unos pocos centímetros, por lo tanto su distancia al centro de la masa terrestre cambiará. Estos efectos tienen una amplitud de la masa de la tierra lo que hace que la gravedad aumente hasta 3 gu (unidades gravimétricas) en un periodo mínimo de 12 horas (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).

2.2.3.3 Corrección por latitud

La gravedad varía con la latitud ya que la forma de la tierra no es esférica y también porque la velocidad angular varía en un punto en la superficie de la tierra disminuyendo en el ecuador hasta llegar a cero en los polos. La aceleración generada por esta rotación hace que la gravedad disminuya desde el polo hasta el ecuador.

El radio polar es de aproximadamente 21 Km, por consiguiente los puntos cerca del ecuador están más alejados de los polos por diferencia de contrastes de densidad (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).

Estas correcciones son hechas usualmente sustrayendo la gravedad normal desde la fórmula internacional de la gravedad, de la gravedad observada o gravedad absoluta. (Milsom, 2003).

La fórmula de Clairut relaciona la gravedad con la latitud tomando de referencia el geoide quedando la ecuación (Ec. 2.2.9) de la siguiente forma:

$$g_{\varnothing} = g_0 (1 + k_1 \sin^2 \varnothing - k_2 \sin^2 2\varnothing) \dots \dots \dots (2.2.9)$$

Donde g_{\varnothing} es el valor de la gravedad previsto en la latitud \varnothing , g_0 es el valor de la gravedad en el ecuador y k_1 , k_2 son constantes dependientes de la forma y rapidez de la rotación de la tierra.

Posteriormente en 1967 (Mittermayer 1969) las constantes fueron ajustadas para minimizar los errores resultantes (Ec. 2.2.10) quedando de la siguiente forma:

$$g_{\phi} = 9\,780\,318.5 (1 + 0.005278895 \sin^2\phi + 0.000023462 \sin^4\phi) g_u \dots\dots\dots(2.2.10)$$

2.2.3.4 Correcciones de Elevación

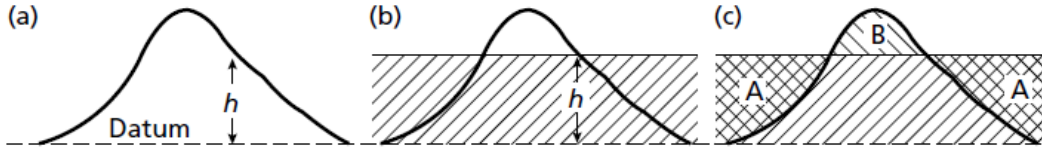


Figura.- 25 a) Corrección por Aire Libre. b) La región sombreada corresponde a una losa de roca de espesor *h* que se extiende hasta el infinito en ambas direcciones horizontales. c) Corrección por terreno (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).

2.2.3.4.1 Corrección por Aire Libre

Las lecturas de gravedad realizadas sobre el continente raramente son efectuadas al nivel del mar; por lo tanto, dichas lecturas requieren que se les aplique una corrección por la elevación de la estación; la gravedad observada al nivel del mar es diferente a la gravedad a una cierta elevación.

La corrección por Aire Libre (Figura 25 a) se calcula como si el punto elevado de una medición estuviera suspendido libremente en el aire sin considerar los efectos de atracción de la masa entre la elevación del punto de observación y el elipsoide de referencia (PEMEX & IMP).

Si el radio de la tierra (a nivel del mar) es *R*, la altura sobre el nivel del mar es (*h*) y el valor de la gravedad (a nivel del mar) es *g*₀, como (*g*) es la gravedad observada en la altura (*h*) (Ec. 2.2.11) puede ser expresado como:

$$g = g_0 \frac{R^2}{(R+h)^2} = g_0 \frac{1}{(1+2h/R)^2} = g_0 \frac{1}{1+2h/R+h^2/R^2} \dots\dots\dots(2.2.11)$$

$$g \cong g_0 \frac{1}{1+2h/R} \text{ como } \frac{h^2}{R^2} \ll \frac{2h}{R} \dots\dots\dots(2.2.12)$$

Usando el primer término de la expresión binomial (Ec. 2.2.12):

$$g \cong g_0 \left(1 - \frac{2h}{R}\right) \dots\dots\dots(2.2.13)$$

Se obtiene finalmente:

$$g - g_0 \cong \Delta g \cong -\frac{2hg_0}{R} \dots\dots\dots (2.2.14)$$

Este efecto será independiente de si hay o no algún material rocoso entre el datum del nivel del mar y la estación a una elevación (h), por esta razón se refiere a corrección por aire libre. (Dobrin & Savit, 1988).

2.2.3.5 Corrección de Bouguer

2.2.3.5.1 Corrección de Bouguer Simple

Esta corrección aproxima toda la masa sobre el nivel del mar con homogeneidad, considera la masa existente entre el nivel de referencia y el punto de observación; como si fuera una losa de gran extensión lateral e igual espesor a la altura del punto de observación (Figura 25 b) (Ec. 2.2.15) (Blakely, 1996), de manera que la atracción gravitacional de una losa infinita será descrita por:

$$\Delta g_{Bou} = 2\pi G\rho h \dots\dots\dots (2.2.15)$$

Dónde h es el espesor de la losa y ρ la densidad de la roca superficial.

La Anomalía de Bouguer simple está dada por (Ec. 2.2.16):

$$\Delta g_{ab} = g_{obs} - g_{fa} - g_{sb} - g_o \dots\dots\dots (2.2.16)$$

La anomalía Bouguer simple ignora la topografía del lugar (montañas y valles, etc.), estos se encuentran por debajo del nivel de observación y forman cavidades dentro de la losa, en este caso la corrección de Bouguer simple tiende a sobrecompensar las mediciones realizadas cerca de un sitio con un relieve topográfico pronunciado, se tiene el inconveniente de que las masas de roca se encuentran por arriba de la altura de la estación observada y no se toma en cuenta la fuerza de atracción que ejerce sobre la estación observada, se debe considerar una fuerza de atracción adicional, este error se compensa con la corrección topográfica, mencionada a continuación (PEMEX & IMP).

2.2.3.5.2 Corrección por terreno

La masa topográfica entre la superficie de la tierra y la superficie de referencia puede tener un efecto fundamental en el valor de gravedad observada. El efecto es estimado y substraído con referencia al elipsoide (Jacoby & Smilde, 2009).

Hay métodos rigurosos para hacer las correcciones por terreno (Figura 25 c), las cuales requieren conocimiento detallado del relieve cercano a la estación y un buen mapa topográfico que englobe más allá del área de estudio (Telford, Geldart, & Sheriff, 1990).

Esta corrección es siempre positiva sin tomar en cuenta si la topografía local corresponde a una montaña o a un valle; se aplica una tabla de valores (Figura 26) y una retícula de Hammer (Figura 27) (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).

Zone	r_1	r_2	n	Zone	r_1	r_2	n
B	2.0	16.6	4	H	1529.4	2614.4	12
C	16.6	53.3	6	I	2614.4	4468.8	12
D	53.3	170.1	6	J	4468.8	6652.2	16
E	170.1	390.1	8	K	6652.2	9902.5	16
F	390.1	894.8	8	L	9902.5	14740.9	16
G	894.8	1529.4	12	M	14740.9	21943.3	16

Figura.- 26 Tabla de Correcciones de terreno (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).

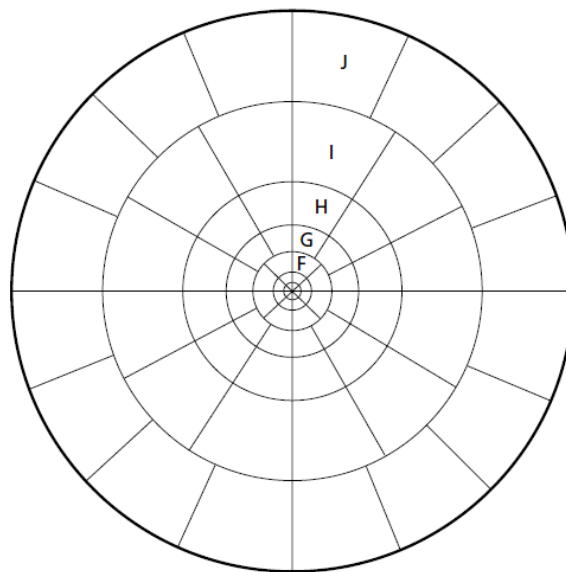


Figura.- 27 Retícula de Hammer utilizada en el cálculo de correcciones de terreno con zonas que varían en un radio de 2 a 21.9 Km, se utiliza con mapas topográficos de diferentes escala (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).

La corrección por terreno o topográfica está dada por la siguiente ecuación (Ec. 2.2.17) en base a la tabla y la retícula de Hammer:

$$T = 0.4191 \frac{\rho}{n} \left(r_2 - r_1 + \sqrt{r_1^2 + z^2} - \sqrt{r_2^2 + z^2} \right) \dots\dots\dots(2.2.17)$$

Donde T= es la corrección por terreno; ρ densidad debida a la corrección de Bouguer (Mgm^{-3}); n= número del compartimento en la zona; r_1 = radio interno de la zona (m); r_2 = radio exterior de la zona (m) y z= módulo de elevación, la diferencia entre el punto de observación y la elevación del compartimiento (m).

La corrección por terreno es un paso esencial en mediciones hechas en lugares con moderado y extremo relieve topográfico (Blakely, 1996). El resultado es la anomalía Bouguer completa está dada por la siguiente ecuación (Ec. 2.2.18):

$$\Delta b_{cb} = g_{obs} - g_{fa} - g_{sb} - g_t - g_0 \dots\dots\dots (2.2.18)$$

2.2.4 Densidades de las rocas

La densidad de una roca depende de su composición mineralógica y porosidad. La variación de la porosidad en la causa principal de la densidad. En una secuencia de rocas sedimentarias, la densidad tiende a aumentar con la profundidad debido a la compactación. En las rocas ígneas y metamórficas el valor de la porosidad es insignificante por lo que su composición es la principal causa de la densidad.

Es necesario tener conocimiento de la densidad de las rocas del sitio de estudio (Figura 28), para la aplicación de correcciones y para la interpretación de las anomalías gravimétricas (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).

Tipo de roca	Densidad (g/cm³)
Aluvión (seco)	1.96-2.00
Lutita	1.63-2.60
Arenisca	
Cretácico	2.05-2.35
Triásico	2.25-2.30
Carbonífero	2.35-2.55
Caliza	2.60-2.80
Dolomita	2.28-2.90
Halita	2.10-2.40
Granito	2.52-2.75
Granodiorita	2.67-2.79
Anortosita	2.61-2.75
Basalto	2.70-3.20
Gabro	2.85-3.12
Gneis	2.61-2.99
Cuarcita	2.60-2.70
Anfibolita	2.79-3.14
Cromita	4.30-4.60
Firocita	4.50-4.80
Magnetita	4.90-5.20
Pirita	4.90-5.20
Casiterita	6.80-7.10
Galena	7.40-7.60

Figura.- 28 Tabla de rangos de densidades aproximados (g/cm³) de algunos tipos de rocas (Kearey, Brooks, & Hill, An Introduction to Geophysical Exploration, 2002).

Capítulo 3. Metodología

3.1 Localización del área de estudio

El área de estudio se encuentra al Noreste del Estado de Baja California limitado al Oeste con Tijuana y hacia el Este por el poblado Vicente Guerrero o mejor conocido como Los Algodones (Figura 29).

La zona se caracteriza por tener un alto potencial geotérmico, ya que es sísmicamente activa con presencia de fallas normales.

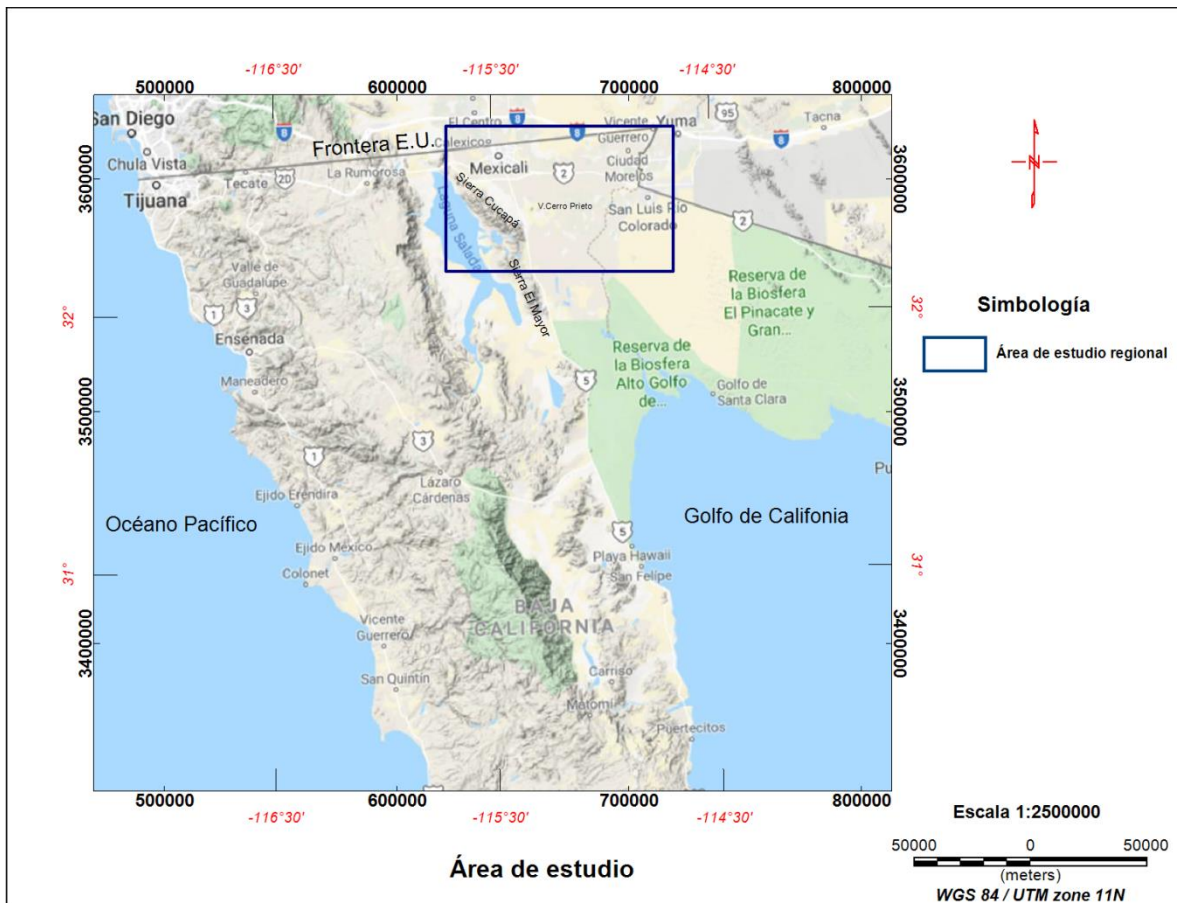


Figura.- 29 Localización del Área de Estudio (Google Maps, 2019).

3.1.1 Zona de estudio

Para la interpretación magnética, gravimétrica y el modelado bidimensional, se trabajó sobre un área de estudio Regional (Figura 30) con una extensión

aproximada de 4,354.83 Km² que abarca en su mayoría la carta geológico-minera de Mexicali (Servicio Geológico Mexicano, 2003).

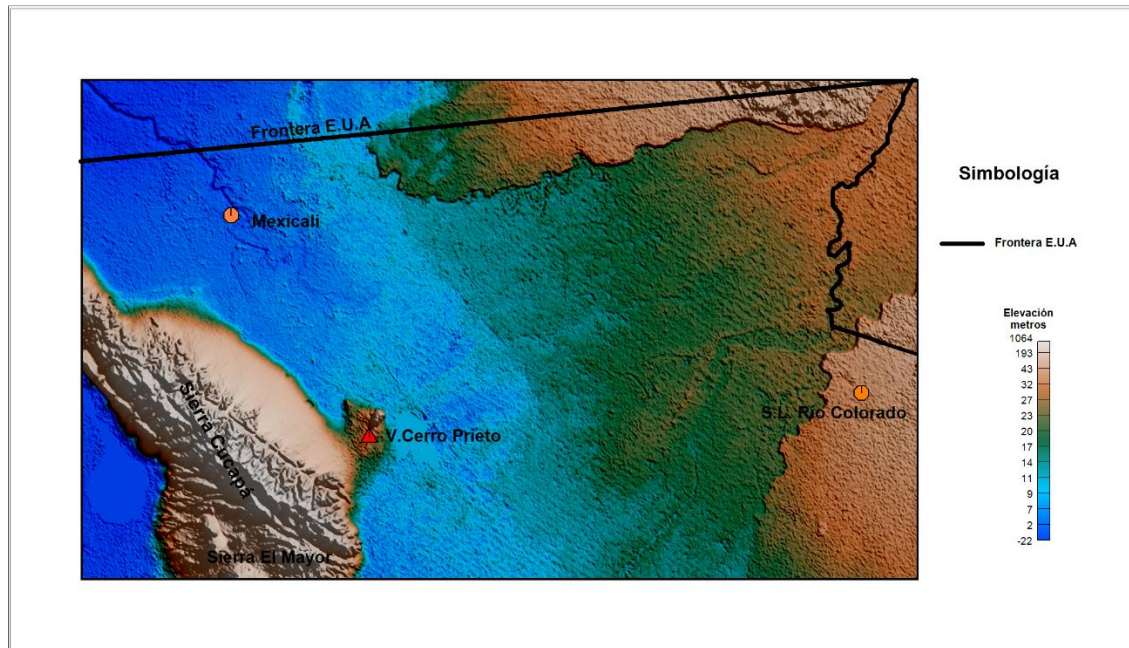


Figura.- 30 Ubicación de la zona de interés (Modelo Digital de Elevación INEGI, 2019).

3.2 Base de Datos

3.2.1 Datos magnéticos

Al no contar con los datos magnéticos observados en campo de toda la región de estudio, se procedió a digitalizar estos, utilizando la carta magnética de campo total a escala 1:250 000 de Mexicali, Baja California (Servicio Geológico Mexicano, 2001) (Figura 31); utilizando un sistema de información geográfica (Global Mapper), se extrajeron los datos de las curvas (coordenadas y elevaciones) con ayuda de un Modelo digital de elevación obtenido de INEGI, con este procedimiento se construyó una base de datos con los siguientes parámetros: coordenadas (UTM Zona 11), elevación (metros) y valores de susceptibilidad magnética (nT). Posteriormente se generó una GRID de IMT (Intensidad Magnética Total) con un tamaño de celda de 400 m aplicando el algoritmo de interpolación Kriging (Figura 40) en el software Oasis Montaj de Geosoft.

De acuerdo a la información de la carta magnética (SGM), las características de adquisición de los datos son los siguientes:

- Altura de vuelo del sensor del avión: 320 m
- Esferoide: CLARKE 1866
- DATUM: NAD 27
- Intervalo entre curvas: 5 nT
- Distancia entre líneas de vuelo fue de cada 1000 m.
- Intensidad: 48103 nT
- Inclinação: 58° 14´
- Declinación: 12° 38´

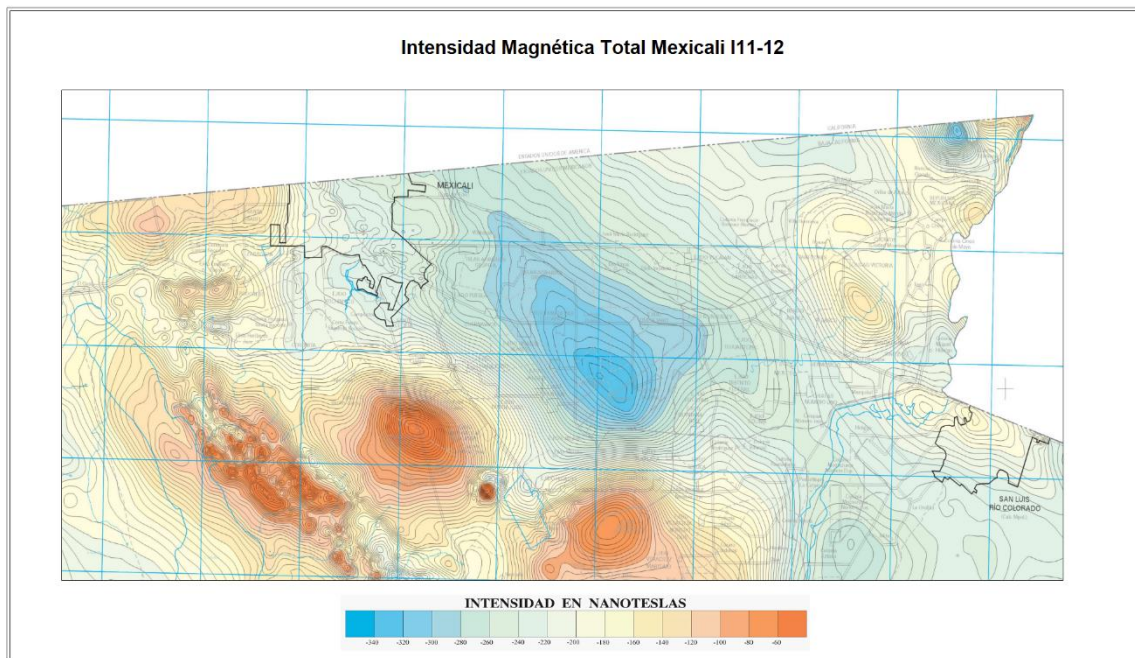


Figura.- 31 Mapa de Intensidad de Campo Total de Mexicali, Baja California (Servicio Geológico Mexicano, 2001).

3.2.2 Datos gravimétricos

En el caso de los datos gravimétricos, se tomaron y se integraron de tres proyectos diferentes: Una base de datos proporcionados por la Compañía Energías Alternas, Estudios y Proyectos S.A de C.V y de mapas de Anomalía de Bouguer obtenidos de dos archivos técnicos de dominio público de CFE (Comisión Federal de

Electricidad) mencionados en el apartado de “Trabajos previos” del presente trabajo. Los datos de anomalía de Bouguer de la parte Centro del área de estudio se obtuvieron a partir de la digitalización de las curvas del mapa (Figura 7) siguiendo el mismo procedimiento de los datos magnéticos, se integraron los datos de las tres áreas en una sola base de datos con los siguientes parámetros: coordenadas (UTM Zona 11), elevación (metros) y valores de Anomalía de Bouguer (mGal). Para la configuración de los datos gravimétricos se utilizó la técnica de interpolación, mediante el algoritmo de Kriging, con un tamaño de celda de 300 m generando una GRID de Anomalía de Bouguer en el software Oasis Montaj de Geosoft (Figura 32).

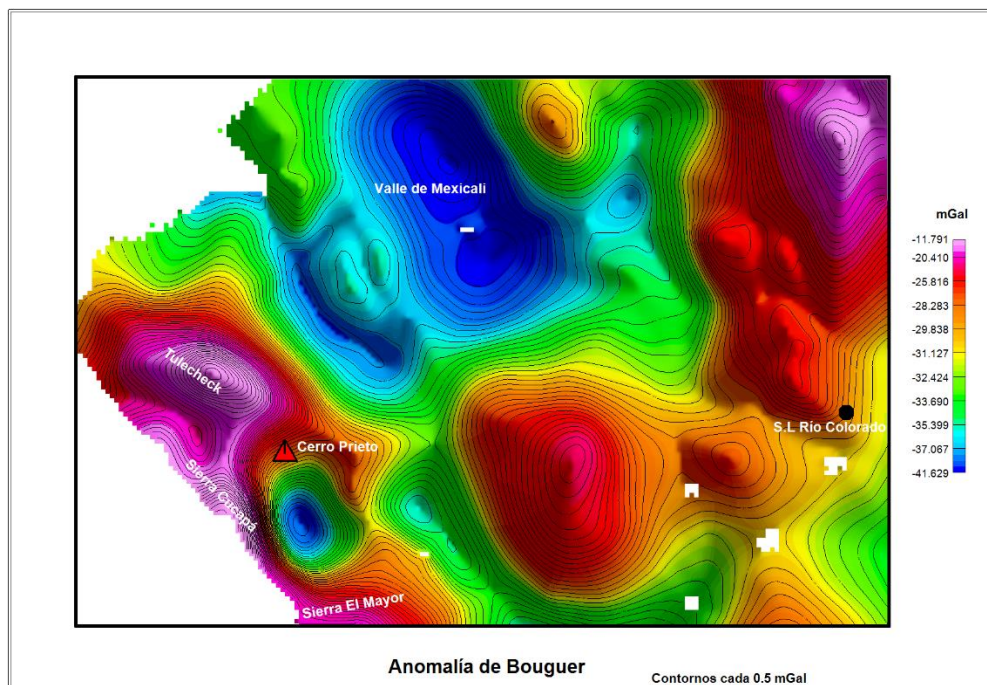


Figura.- 32 Mapa de Anomalía de Bouguer (Oasis Montaj-Geosoft).

A partir de las GRIDS de IMT (Intensidad Magnética Total) y Anomalía de Bouguer y en función del análisis de Fourier, se generaron diferentes mapas: Campo magnético total reducido al polo, separación regional-residual, derivada vertical (Z), gradiente horizontal total y señal analítica.

A continuación se describen los siguientes filtros o procesos matemáticos utilizados:

3.3 Procesamiento y filtrado matemático

3.3.1 Reducción al Polo

Debido a que el campo magnético terrestre es dipolar, las anomalías magnéticas producidas por un cuerpo suelen tener un sesgo, ya que el vector de magnetización y el campo magnético no están en dirección vertical, lo cual hace más compleja su visualización en términos de las posibles fuentes magnéticas en el subsuelo (Ortiz, 2015).

Para simplificar la forma de la anomalía se propuso la técnica numérica llamada reducción al polo (Figura 33), ya que transforma la anomalía IMT (Intensidad magnética total) en una anomalía que puede medirse en el polo norte magnético de la tierra, reubicando verticalmente las anomalías magnéticas sobre sus fuentes causativas correspondientes (PEMEX & IMP). Remueve la dependencia que tienen las anomalías en función de la inclinación y la declinación, elimina o minimiza la asimetría y los desplazamientos laterales de las anomalías del campo magnético total relacionados con las desviaciones de las direcciones de magnetización (Ortiz, 2015).

La expresión matemática de la reducción al polo (Ec. 3.3.1) es la siguiente:

$$RTP(p, q) = \frac{k^2}{[ip\alpha + iq\beta + \gamma\sqrt{p^2 + q^2}][ip\alpha_M + ip\beta_M + \gamma_M\sqrt{p^2 + q^2}]} \dots\dots\dots (3.3.1)$$

Donde:

$$\alpha = \cos(I) \cos(D)$$

$$\alpha_M = \cos(I_M) \cos(D_M)$$

$$\beta = \cos(I) \sin(D)$$

$$\beta_M = \cos(I_M) \sin(D_M)$$

$$\gamma = \sin(I)$$

$$\gamma_M = \sin(D_M)$$

$$k = \sqrt{p^2 + q^2}$$

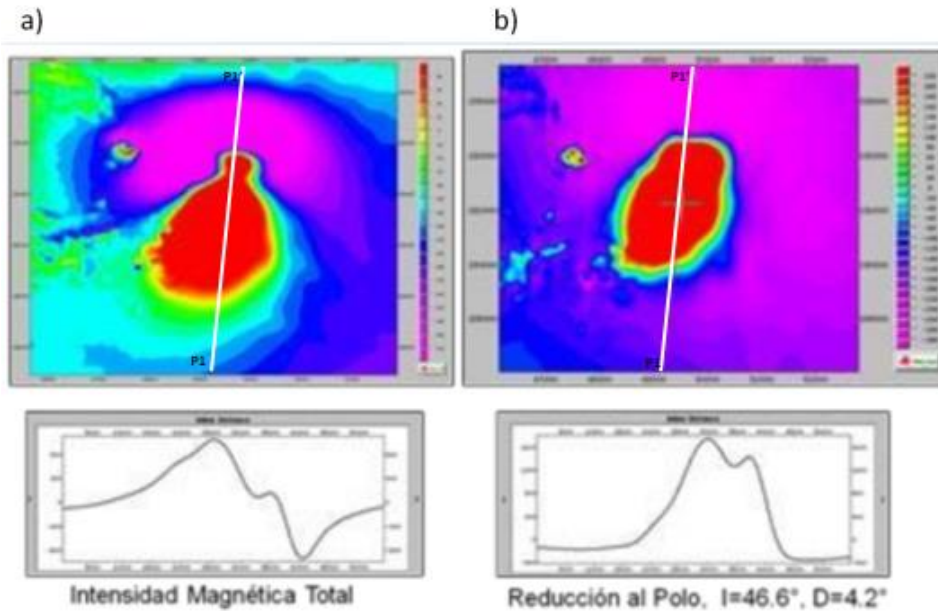


Figura.- 33 a) Anomalía Magnética de Campo Total b) Reducción al Polo (Instituto Mexicano del Petróleo , 2015).

3.3.2 Separación Regional-Residual

Este paso es crucial para la interpretación de anomalías magnéticas y gravimétricas para poder separar las variaciones regionales de las variaciones locales (Figura 34). La separación de las anomalías se realizan a través de diferentes métodos, por ejemplo con un ajuste polinomial a la tendencia regional que se es sustraída de la anomalía, dando como resultado la anomalía residual y algunos otros más complejos como los filtros pasa-bandas a distintas frecuencias. La anomalía residual realza los cuerpos someros que han sido enmascarados por efectos regionales (Escorza Reyes, 2010). Por lo tanto tomando en consideración que las fuentes que generan las amplitudes y longitudes en las anomalías están fuertemente afectadas por la profundidad, espesor, extensión de los cuerpos rocosos, se busca separar las longitudes de ondas largas generadas por fuentes profundas de las longitudes de ondas cortas generadas por fuentes superficiales (Ortiz, 2015).

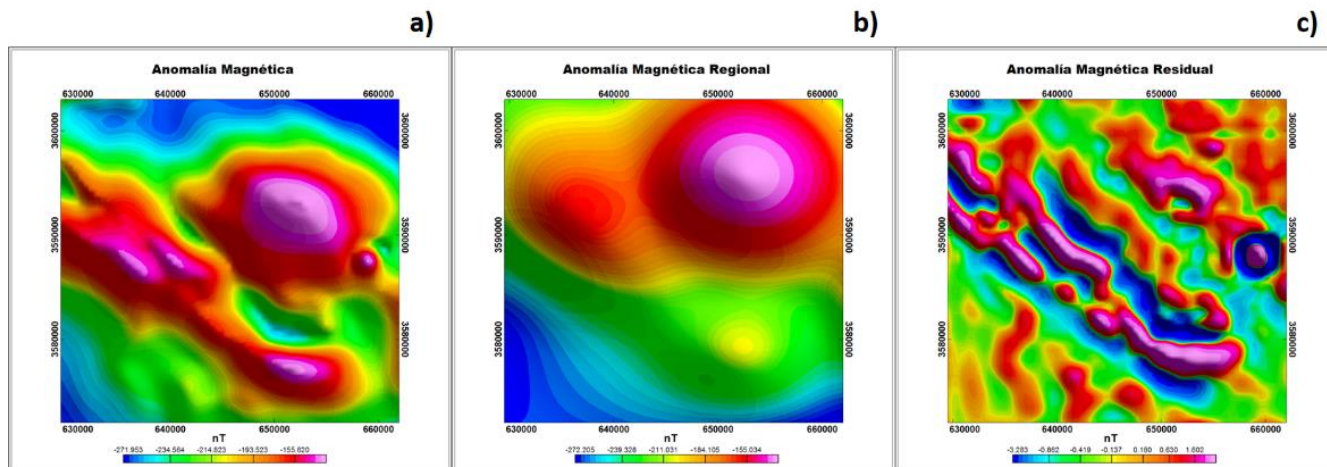


Figura.- 34 a) Anomalia Magnética b) Anomalia Magnética Regional c) Anomalia Magnética Residual- Oasis Montaj.

3.3.2 Derivada vertical

Las derivadas verticales amplifican la información de la longitud de onda corta. Las primeras derivadas verticales acentúan los gradientes a lo largo de los bordes de las fuentes magnéticas, por lo tanto se utiliza para ubicar los bordes de los cuerpos magnéticos y enfatizar fuentes poco profundas (Figura 35) (Dobrin & Savit, 1988).

La segunda derivada vertical medida en una superficie horizontal, es una técnica de interpretación ya que acentúa bordes de fuentes poco profundas

El uso de las derivadas verticales ha sido un método de procesamiento de datos para destacar valores de alta frecuencia. Es así que como la segunda derivada vertical se calculaba utilizando un filtro de convolución partiendo de la ecuación de Laplace (Ec. 3.3.2) (Cárdenas Contreras & Castillo López, 2013):

$$\nabla^2 f = 0 \dots\dots\dots (3.3.2)$$

Según la relación (Ec. 3.3.3):

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (3.3.3)$$

Al utilizar el filtro de Fourier se obtiene la derivada n-ésima (Ec. 3.3.4) a partir de la siguiente relación:

$$F_0 \left(\frac{\partial^n f}{\partial z^n} \right) = k^n \cdot F(f) \dots \dots \dots (3.3.4)$$

Donde F_0 representa el campo de Fourier y k es el número de onda.

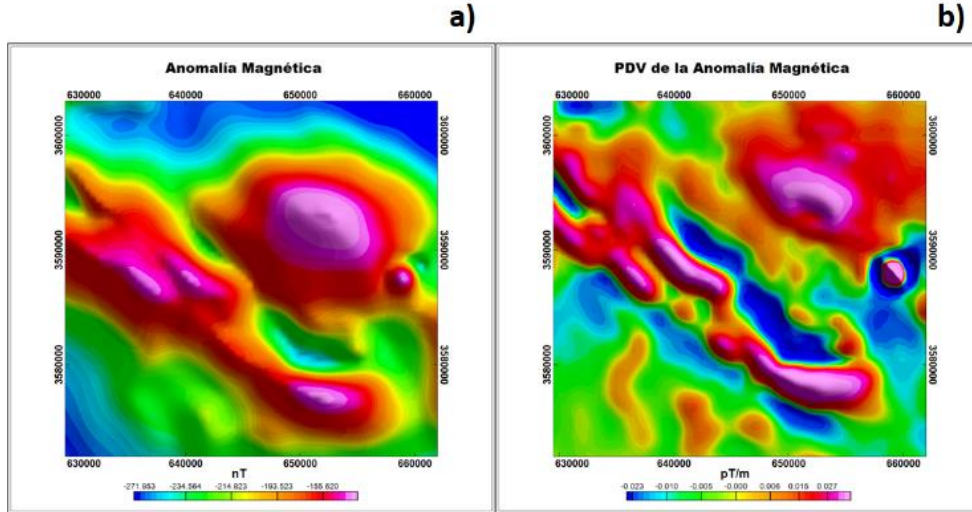


Figura.- 35 a) Anomalia Magnética b) Primera derivada vertical de la Anomalia Magnética- Oasis Montaj.

3.3.3 Gradiente Horizontal

Es un filtro digital que calcula la variación de la magnitud de los datos en relación con la distancia horizontal (Figura 36). Este proceso se aplica con base en la definición de los límites o dimensiones horizontales de las estructuras o cuerpos anómalos (fallas, cuerpos ígneos intrusivos, etc.); el límite horizontal de los cuerpos anómalos y/o contactos estructurales, se correlaciona con los máximos del gradiente horizontal (PEMEX & IMP). Estos máximos obtenidos reflejan la presencia de los bordes de la fuente magnética que causa la anomalía, sin embargo cabe mencionar que tiene ciertas limitaciones por ejemplo, los datos no se ubicarán sobre los límites de las estructuras cuando los contactos no sean verticales o semiverticales o cuando se tengan varios contactos muy cercanos y la superficie de observación sea ondulada (Ortiz, 2015).

La amplitud del gradiente horizontal está definido por la siguiente ecuación (Ec. 3.3.5):

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \dots \dots \dots (3.3.5)$$

Donde T es el campo magnético, $\partial T/\partial x$, $\partial T/\partial y$ son las derivadas horizontales ortogonales del campo magnético.

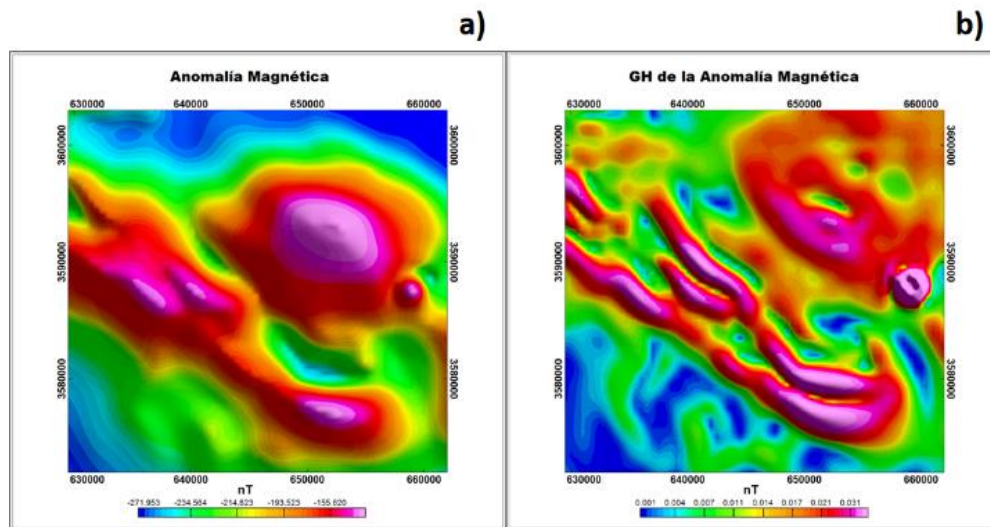


Figura.- 36 a) Anomalía Magnética b) Gradiente Horizontal de la anomalía Magnética- Oasis Montaj.

3.3.4 Señal Analítica

La técnica denominada como señal analítica o mejor conocida como el método del gradiente total, produce un tipo de mapa que realza las anomalías de campo potencial (Figura 37), también es usada para definir fronteras; los máximos de la señal analítica son útiles para estimar la profundidad de datos cuadrículados, contactos magnéticos, estructuras y fallas. (Alatorre Zamora, Rosas Elguera, Pérez Rodríguez, Campos Enríquez, & Maciel Flores, 2012).

Al aplicar la transformada de Hilbert o de Fourier al dominio de las frecuencias sobre la componente horizontal, produce una señal analítica, en donde la parte imaginaria resulta ser la derivada vertical del mismo campo. El resultado es representado por una curva en forma de campana, la cual tiene simetría con respecto a un eje vertical (Granadas Aguilar, 2010).

La señal analítica es una función compleja (Ec. 3.3.6) que se expresa de la siguiente manera (Cortés Guerrero , 2014):

$$sa(x) = f(x) - iH[f(x)] \dots\dots\dots(3.3.6)$$

Donde:

$sa(x)$ = señal analítica.

$f(x)$ = Parte real de la señal analítica o función original.

$H[f(x)]$ = Transformada de Hilbert de $f(x)$.

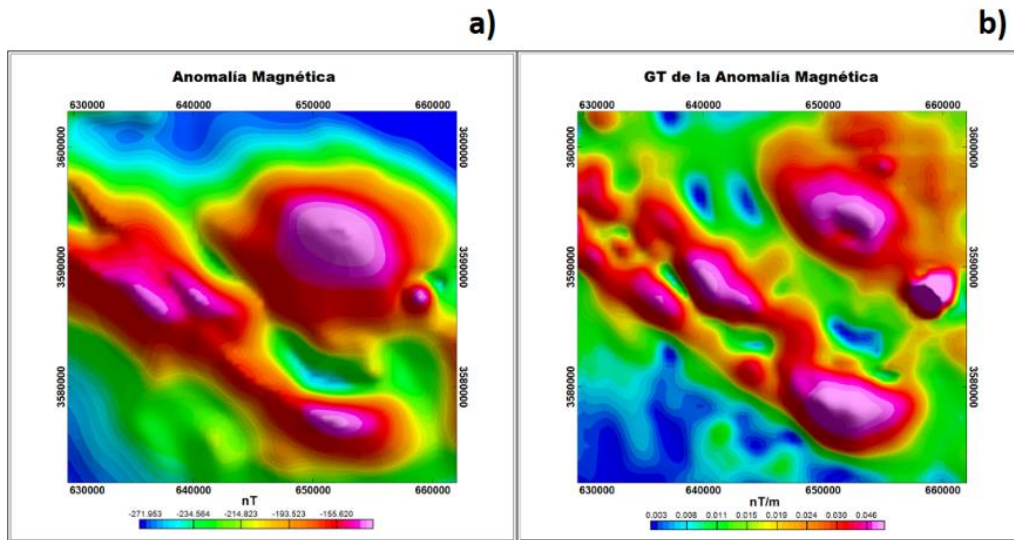


Figura.- 37 a) Anomalía Magnética b) Gradiente Total o Señal Analítica de la Anomalía Magnética- Oasis Montaj.

Capítulo 4 Resultados

4.1 Interpretación Estructural

A partir de diferentes tipos de mapas, (Relieve de Google Earth y Maps for free) (Anexos 1, 2 y 5) y una imagen del Modelo Digital de Elevación (Figura 38), se realizó un análisis estructural de la zona de estudio de forma manual, resaltando lineamientos o patrones, fallas y fracturas. En este apartado se muestra el Modelo Digital de Elevación con su respectivo análisis estructural. Los demás mapas se expondrán en la parte de Anexos.

4.1.1 Modelo Digital de elevación

El modelo digital de elevación de la región estudiada fue obtenido de INEGI con una resolución aproximada de 90 m. El área analizada abarca desde la Península de Baja California en el extremo Oeste, extendiéndose hasta la zona centro del Delta del Rio Colorado, limitando con la zona Sur de California (Estados Unidos).

Con base en la interpretación realizada se obtuvieron los siguientes lineamientos:

En la zona Oeste de la Península de Baja California se observan patrones con orientaciones NW-SE, WNW-ESE y NNW-SSE, este último es la dirección principal en la cual se fue desplazando la corteza de la península.

Al sur se muestra una estructura en forma de cuña con orientación NW-SE; en esta zona se puede apreciar patrones NNW-SSE en su mayoría, SW-SE y NW-SE.

Posteriormente hacia el centro se visualiza dos patrones principales que se extienden desde Noroeste hasta el Noreste de la zona analizada: El primer patrón (NW-SE) se alinea con las estructuras aflorantes en el área: Sierra Cucapá ubicada al Sur de Mexicali y el Volcán Cerro Prieto. El segundo patrón tiene una orientación preferencia NE-SW.

En la zona Este, limitando con el Estado de Sonora resalta otro patrón con orientación similar al de la zona centro NW-SE pero con un ángulo más pronunciado, estos lineamientos probablemente son resultantes de esfuerzos originados de la región de Sonora.

Como se puede Observar en la (Figura 38) y en las anteriores descripciones hay dos sistemas de patrones principales que predominan (líneas negras): El primer

patrón con dirección preferencial NW-SE fue creado por tensión a consecuencia de levantamientos regionales y posteriores hundimientos locales.

El segundo patrón SW-NE se originó por esfuerzos cortantes en las líneas de máxima tensión al realizarse desplazamientos horizontales (Espinoza & Mooser, 1964).

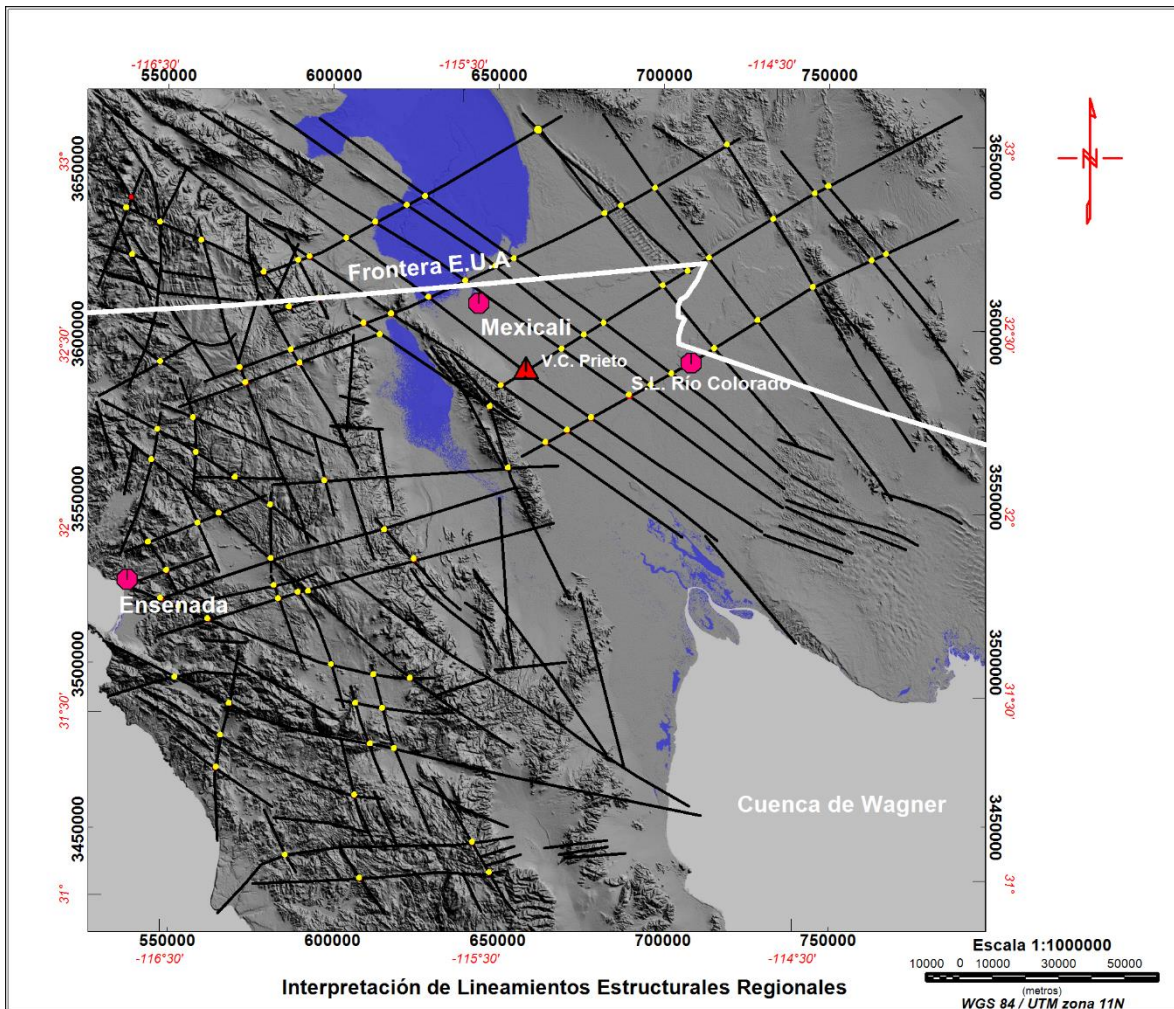


Figura.- 38 Interpretación de Lineamientos Estructurales Regionales de la zona Norte del Estado de Baja California sobre el Modelo Digital de Elevación (INEGI, 2019). Se observan las localidades principales: Mexicali, Ensenada, San Luis Río Colorado (puntos rosas) y el volcán Cerro Prieto (triángulo rojo). Se muestra el límite de frontera entre México y Estados Unidos (línea blanca).

Finalmente se hizo una interpretación de lineamientos estructurales locales sobreponiéndolos sobre el mapa de Intensidad Magnética Total Reducida al Polo que abarca desde Sierra Cucapá, extendiéndose hacia San Luis Río Colorado, limitando hacia la frontera con Estados Unidos. En esta área se visualizan dos

patrones con orientación preferencial NW-SE y NE-SW, algunos de estos patrones se alinean con la Sierra Cucapá, Sierra El Mayor, Cerro Prieto y con las fallas principales en esa región: Falla Cucapá, Pescadores, Laguna Salada, Chupamirtos, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Morelia, Hidalgo, Pátzcuaro, Delta, Imperial, Brawley, Calipatria, San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones (líneas negras) (Figura 39). La intercepción de estos lineamientos o patrones (lineamientos blancos) nos muestran zonas de debilidad de la corteza terrestre (puntos rojos) (Figura 39), algunos de estos sitios caen sobre fallas y sobre altos magnéticos indicando probabilidades de desarrollo geotérmico, como en el caso de Cerro Prieto que actualmente es un campo geotérmico documentado en el apartado de “Trabajos Previos”.

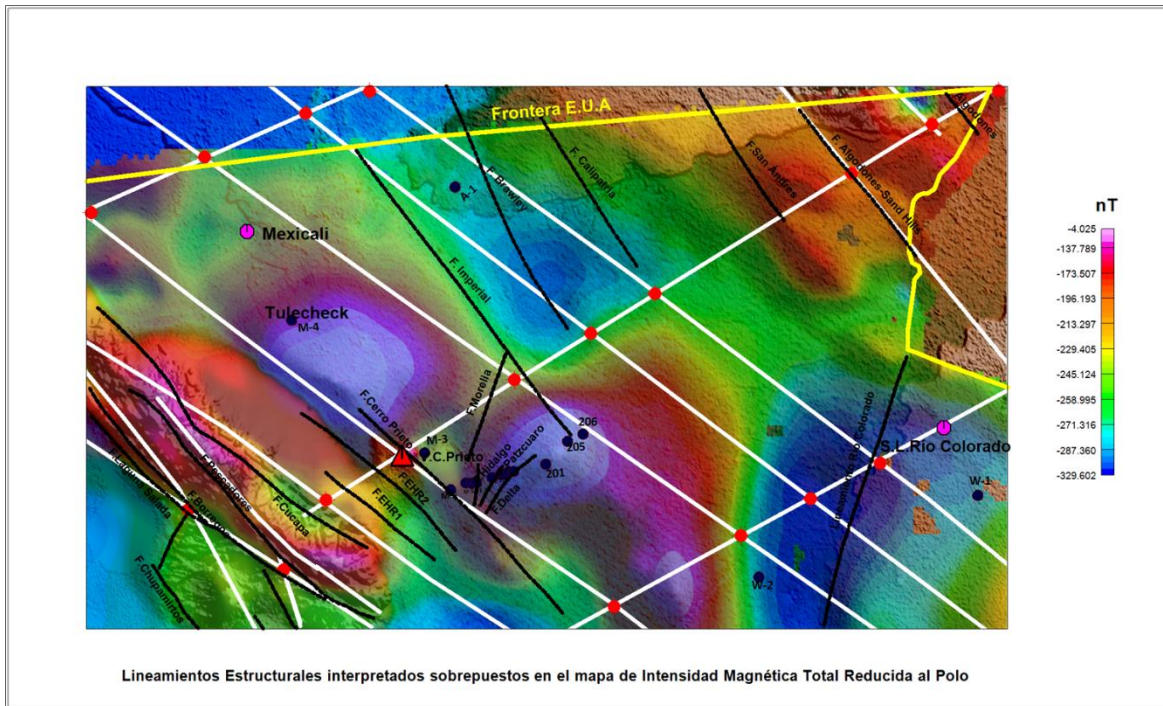


Figura.- 39 Lineamientos Estructurales Interpretados sobrepuestos en el Mapa de Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se observan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos rosas) y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo). Se observan los pozos que se perforaron sobre la región estudiada (puntos negros).

4.2 Interpretación de Mapas Magnéticos

4.2.1 Mapa de Intensidad Magnética Total

El mapa de Intensidad magnética total representa la intensidad de campo medida en el sitio. Dentro del área de estudio, la intensidad magnética varía entre -38.5 y -351.96 nT. Se identificaron zonas que presentan longitudes de onda con una amplitud alta como baja, por consiguiente estas zonas se caracterizan por tener susceptibilidades altas y bajas. Se puede observar la mayor intensidad al Sur de Mexicali y al Este, asociados al complejo volcánico Cerro Prieto, Sierra Cucapá, Sierra el Mayor, Tulecheck y a sitios de debilidad asociadas a las fallas: Cucapá, Pescadores, Laguna Salada, Chupamirtos, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Imperial, Brawley, Calipatria, San Andres, Algodones-Sand Hills, Algodones (lineamientos negros) (Figura 40).

La intensidad magnética medida decae en la zona de la falla Laguna Salada, donde la intensidad es menor en el margen occidental y en la zona centro extendiéndose en casi todo el Valle de Mexicali donde se observa un fuerte contraste litológico.

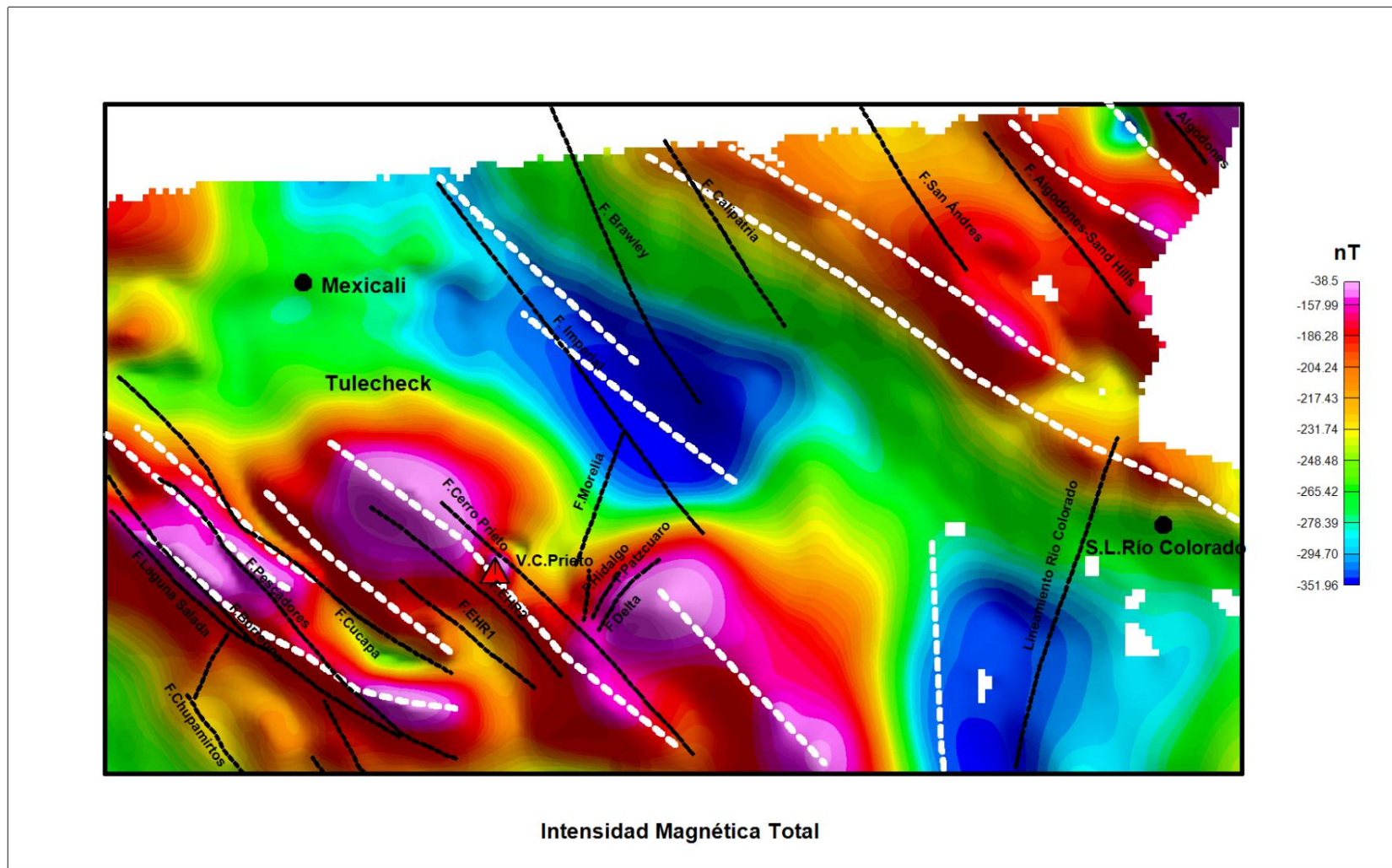


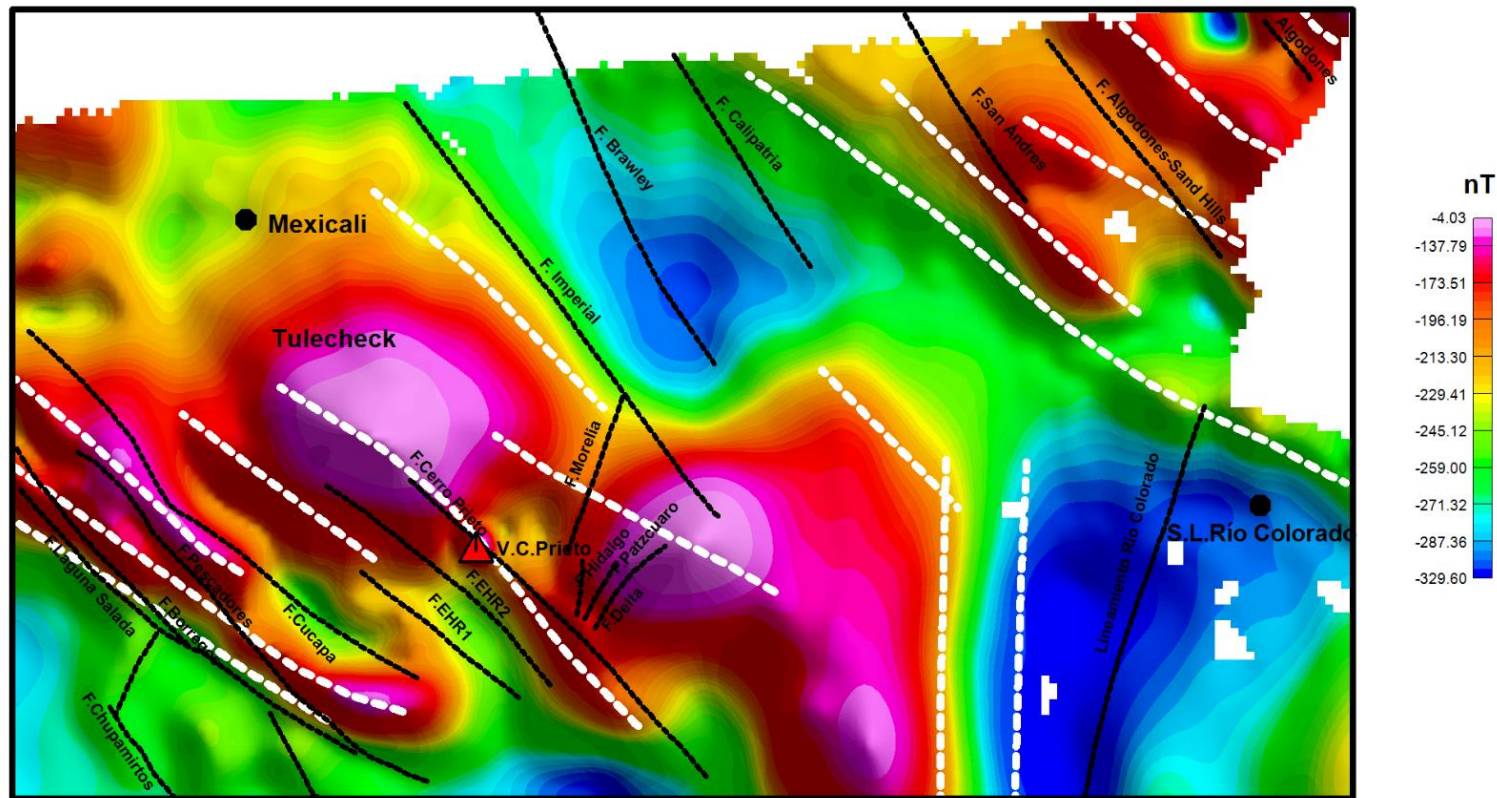
Figura.- 40 Mapa de Intensidad Magnética Total. Se visualiza los lineamientos magnéticos interpretados (líneas punteadas blancas). Se observan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos rosas) y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo).

4.2.2 Mapa de Anomalía Magnética Reducida al Polo

La reducción al polo es un método matemático que recalcula la anomalía observada para posicionar la magnetización del cuerpo en dirección vertical, por consiguiente posiciona la anomalía como si se hubiera hecho la medición en el polo magnético sur (Jerónimo Bayona, 2015).

Respecto de los datos de Intensidad magnética total se le sustrajo el valor de IGRF 1995 para obtener la anomalía magnética y posteriormente se le aplicó la reducción al polo.

El análisis de la configuración de reducción al polo presenta principalmente lineamientos magnéticos NW-SE (líneas blancas punteadas) (Figura 41). Las anomalías con altas susceptibilidades magnéticas tienen esta tendencia debido a que se sitúan en zonas de debilidad teniendo un alto potencial geotérmico; en el caso de Cerro Prieto que se originó sobre la falla que lleva su mismo nombre (Figura 41); este complejo volcánico está compuesto de riodacita así que su susceptibilidad magnética va de -92 a -4 nT. En el caso de Sierra Cucapá, Sierra el Mayor y Tulechek son zonas donde hay afloramientos del basamento de tipo metasedimentario así como intrusiones granodioríticas por lo que se observan susceptibilidades de -72 a -4 nT. La zona del Valle de Mexicali presenta susceptibilidades magnéticas bajas que van desde -330 a -230 como respuesta del relleno sedimentario de la fosa tectónica, dando indicios de que el basamento está muy profundo. Este relleno sedimentario se conforma de lutitas, areniscas y sedimentos de origen deltaico depositados de la zona del Río Colorado, Sonora y zona Sur de California, por lo que su respuesta es baja.



Intensidad Magnética Total Reducida al Polo

Figura.- 41 Mapa de Intensidad Magnética Total Reducida al polo. Se observa el sistema de fallas de la región proyectadas del mapa geológico de Mexicali por SGM y de Anomalía de Bouguer de la zona Aeropuerto Este-San Luis Río Colorado y Tulecheck-Aeropuerto (Fonseca, Díaz, C, Puente, & de la Peña), las cuales son: Falla Chupamirtos, Laguna Salada, Cucapá, Pescadores, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Imperial, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Calipatria, Brawley San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones y el lineamiento Río Colorado (lineamientos negros). Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo).

4.2.3 Mapa de Configuración Regional de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo

El dominio I (líneas punteadas blancas) (Figura 42), se ubica en la parte Sur de Mexicali extendiéndose hacia la parte centro del área de estudio, abarcando Sierra Cucapá, Sierra El Mayor, Tulecheck y el complejo volcánico Cerro Prieto, dicha anomalía magnética sigue un rumbo preferencial NW-SE. Se caracteriza por ser un alto magnético con una intensidad magnética de -180 a -89 nT.

Geológicamente parte de este dominio se correlaciona con rocas metamórficas y granodioritas del basamento que afloran en la Sierra Cucapá y en la parte Norte de la Sierra El Mayor, en el complejo volcánico Cerro Prieto se tiene coladas basálticas y andesíticas. El alto magnético en la zona de Tulecheck está relacionado con la cercanía al complejo granítico que conforma a la Sierra Cucapá. La anomalía magnética al Sureste del Volcán Cerro Prieto se debe al basamento granítico y metamórfico de esa zona que aunque está sepultado se infiere que este no está tan profundo.

El dominio II (líneas punteadas blancas) (Figura 42), se identifica en la porción Este del Valle de Mexicali llamada Mexicali-Algodones, presenta un alto magnético debido a un posible levantamiento de los bloques del basamento granítico con base a la respuesta magnética ya que no se cuenta con afloramientos en superficie.

Los dominios III, IV y V (líneas punteadas blancas) (Figura 42), se encuentra en el Valle de Mexicali extendiéndose hasta San Luis Río Colorado, caracterizado por un bajo magnético entre -240 a -280 nT. Geológicamente este dominio se correlaciona con el relleno de la fosa tectónica y con probabilidad de que el basamento este muy profundo en toda esa zona, dando una respuesta de baja susceptibilidad magnética.

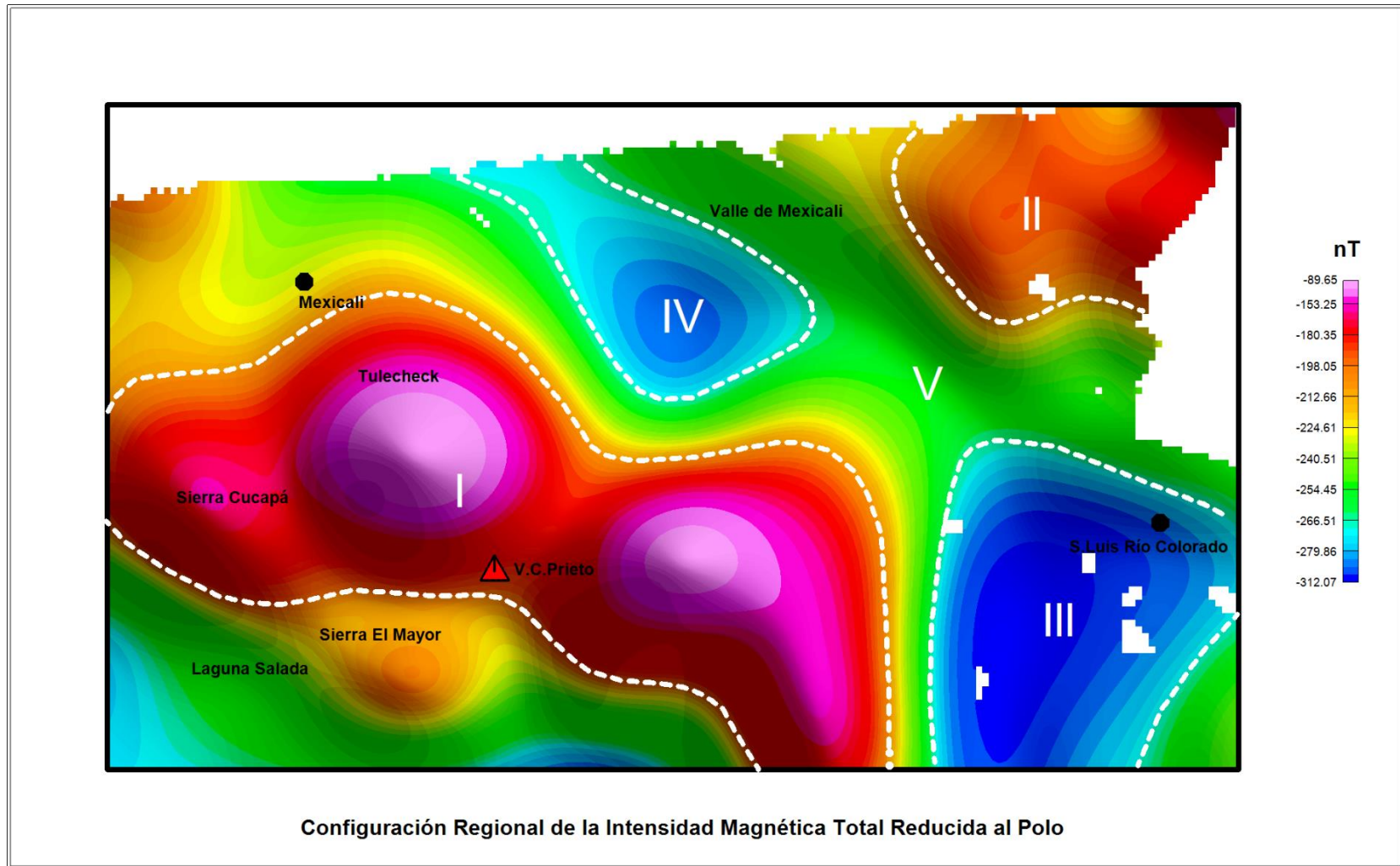


Figura.- 42 Mapa de configuración Regional de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se observan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo).

4.2.4 Mapa de configuración Residual de la Intensidad Magnética Total reducida al Polo

La separación de anomalías magnéticas es un paso importante para la interpretación cualitativa de un mapa magnético. Las anomalías residuales por consiguiente están relacionadas a longitudes de onda corta y a altas frecuencias, causados por cuerpos anómalos superficiales cercanos al punto de medición (Pérez Orrego, 2017).

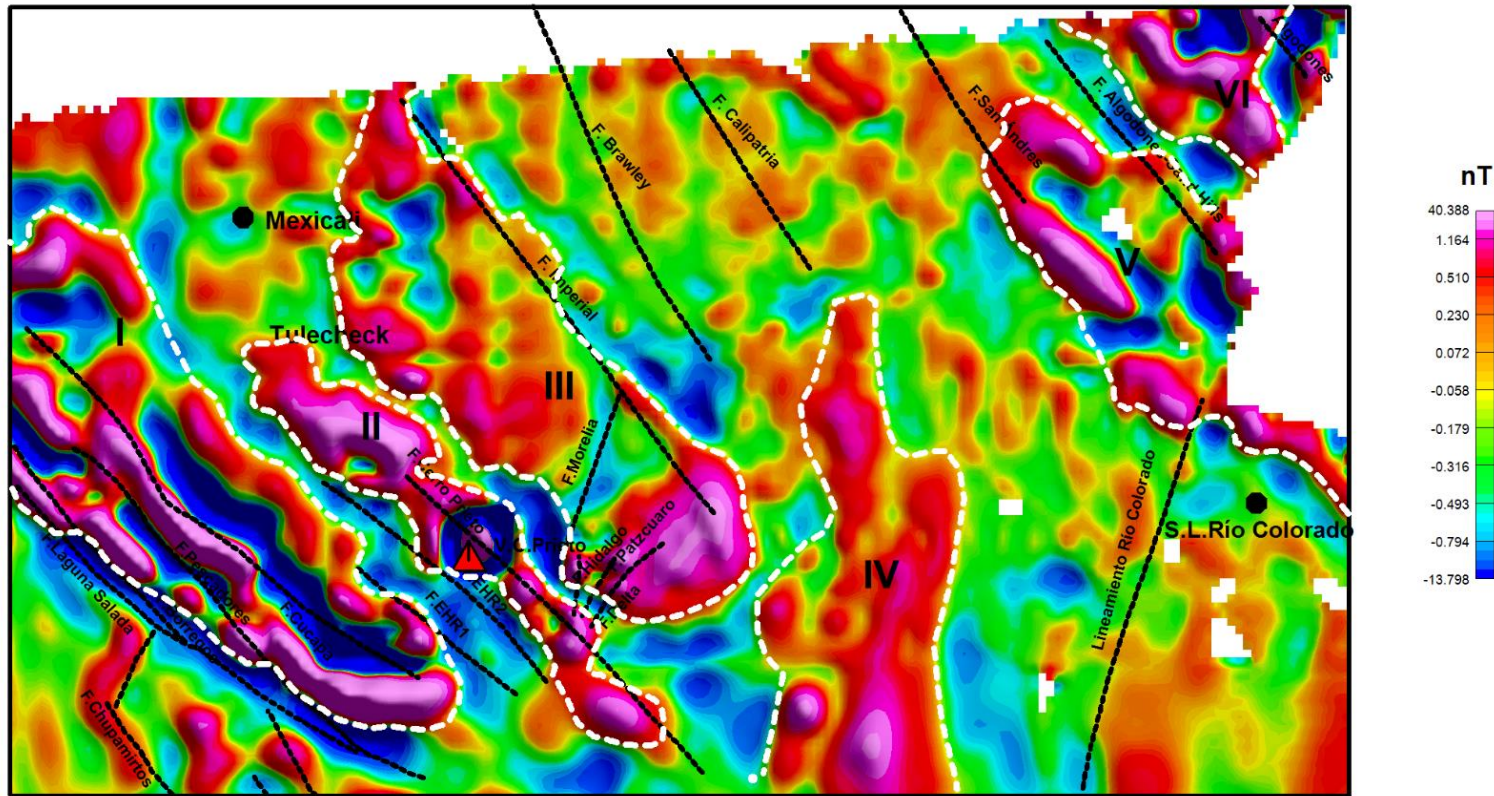
El mapa de configuración residual (Figura 43) es resultado de la separación residual-regional mediante un filtro suave que se utiliza frecuentemente como un filtro pasa bajo o pasa alto llamado "Filtro Gaussiano regional/residual" (Jefferson Andrew, 2018).

Como se muestra en la (Figura 43) se resaltaron seis dominios magnéticos (líneas blancas punteadas):

Los dominios I, II y III ubicados en la zona Sur de Mexicali son altos magnéticos asociado a la Sierra Cucapá, El Mayor y al Volcán Cerro Prieto relacionado a afloramientos granodioríticos, andesíticos-tobas dacíticas, esquistos verdes y anfibolitas. Colindando al norte de Cerro Prieto se distingue otro cuerpo con un alto magnético asociado a la zona de Tulecheck donde hay presencia de hidrotermalismo y la litología presente se asocia con el afloramiento granítico de la zona norte de la Sierra Cucapá. Dichos dominios tienen una orientación preferencial NW-SE.

Hacia el Oeste de San Luis Río Colorado se localiza el dominio IV teniendo una respuesta magnética alta debido al hidrotermalismo presente en la zona documentado (Fonseca, Díaz. C, Puente, & de la Peña).

Al adentrarse al Noreste de Mexicali se visualizan los dominios V y VI, altos magnéticos asociados con una posible presencia de intrusiones metamórficas y graníticas pertenecientes al complejo metamórfico Bámori y el terreno de Caborca en el Estado de Sonora.



Configuración Residual de la intensidad Magnética Total Reducida al Polo

Figura.- 43 Mapa de Configuración Residual de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se observa el sistema de fallas de la región proyectadas del mapa geológico de Mexicali por SGM y de Anomalía de Bouguer de la zona Aeropuerto Este-San Luis Río Colorado y Tulecheck-Aeropuerto (Fonseca, Díaz, C, Puente, & de la Peña), las cuales son: Falla Chupamirtos, Laguna Salada, Cucapá, Pescadores, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Imperial, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Calipatria, Browley San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones y el lineamiento Río Colorado (lineamientos negros). Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo).

4.2.5 Mapa de la Primera Derivada Vertical de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo

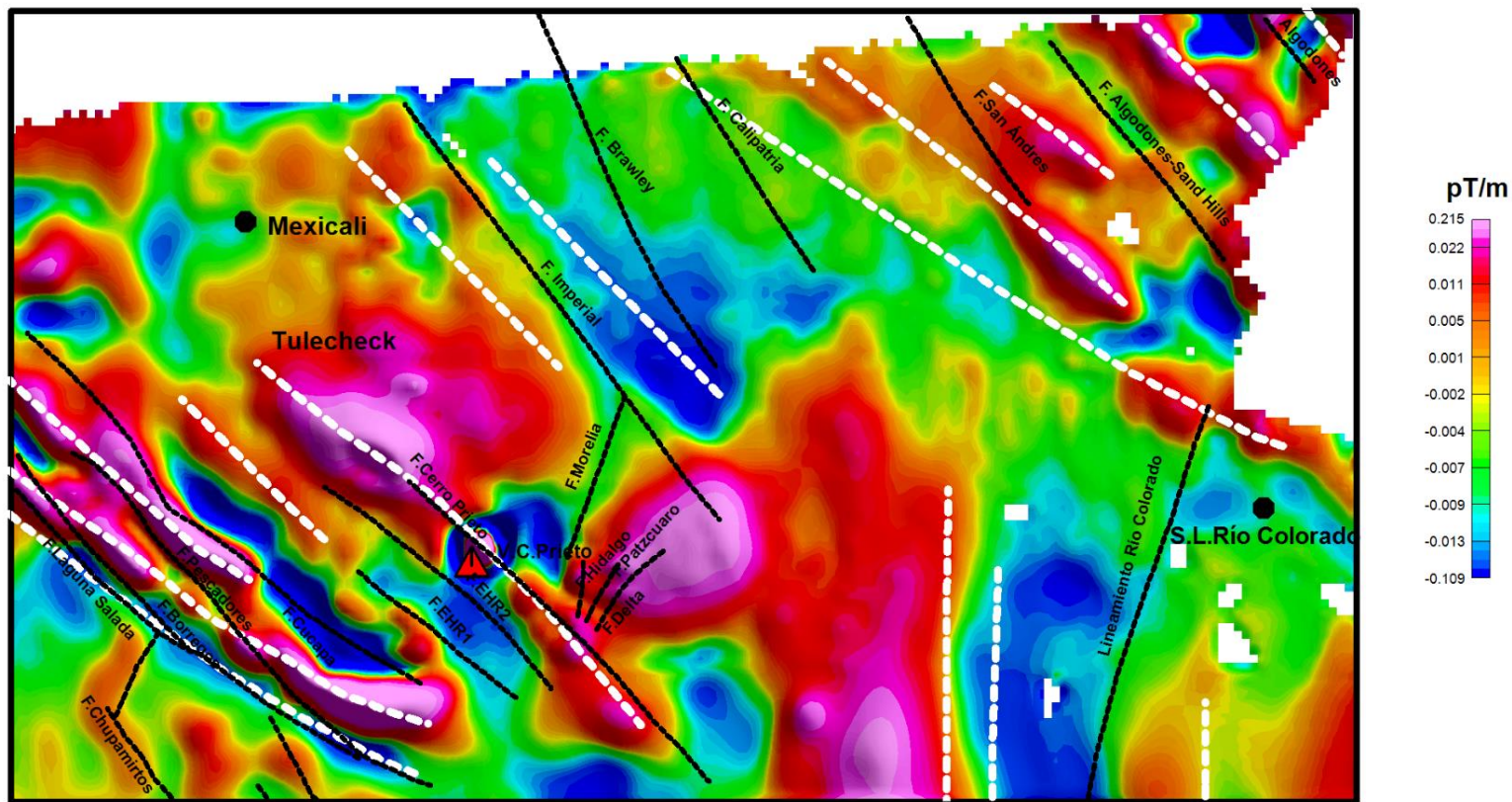
Las derivadas verticales en general resaltan la información de la longitud de onda corta y en particular la de primer orden acentúan los gradientes a lo largo de los bordes de las fuentes magnéticas, por lo tanto se utiliza para ubicar los bordes de los cuerpos magnéticos y enfatizar fuentes poco profundas (Dobrin & Savit, 1988). En el mapa de la configuración de la primera derivada vertical del campo magnético reducido al polo (Figura 44), nos ayuda a delimitar y resaltar los cuerpos someros dando como resultados lineamientos magnéticos bien definidos los cuales están asociados a fallas y estructuras. Las fallas presentes en la zona de la Sierra Cucapá y Sierra El Mayor sobresalen como también el lineamiento magnético de laguna Salada que con base en la geología del sitio se debe a la falla con el mismo nombre (Figura 44).

Para el caso de la anomalía asociada al volcán Cerro Prieto, se acentúan los bordes de la estructura de este volcán, el alto magnético de este cuerpo proviene de las coladas basálticas y andesíticas, también se acentúan algunos lineamientos magnéticos asociados a fallas y fracturas (lineamientos negros) que en los anteriores mapas no se percibían con claridad, como en el caso de las fallas: Chupamirtos, Pescadores, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Imperial, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Calipatria, Browley San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones y el lineamiento Río Colorado (Figura 44).

Asimismo se acentúa los bordes de la fuente magnética que está causando la anomalía localizada al Sureste de Cerro Prieto, esta anomalía es causada por las posibles intrusiones basálticas en el sitio, cabe mencionar que está limitada por las fallas Cerro Prieto e imperial convirtiéndola en una zona de debilidad.

Hacia San Luis Río Colorado se resalta una anomalía muy particular con orientación N-S, debida al depósito sedimentario de la cuenca de Altar.

En la zona Noreste limitando con California se realzan lineamientos magnéticos (líneas punteadas blancas) con susceptibilidades altas con orientación NW-SE asociados a intrusiones metamórficas y graníticas.



Primera Derivada Vertical de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo

Figura.- 44 Mapa de Primera Derivada vertical de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo).

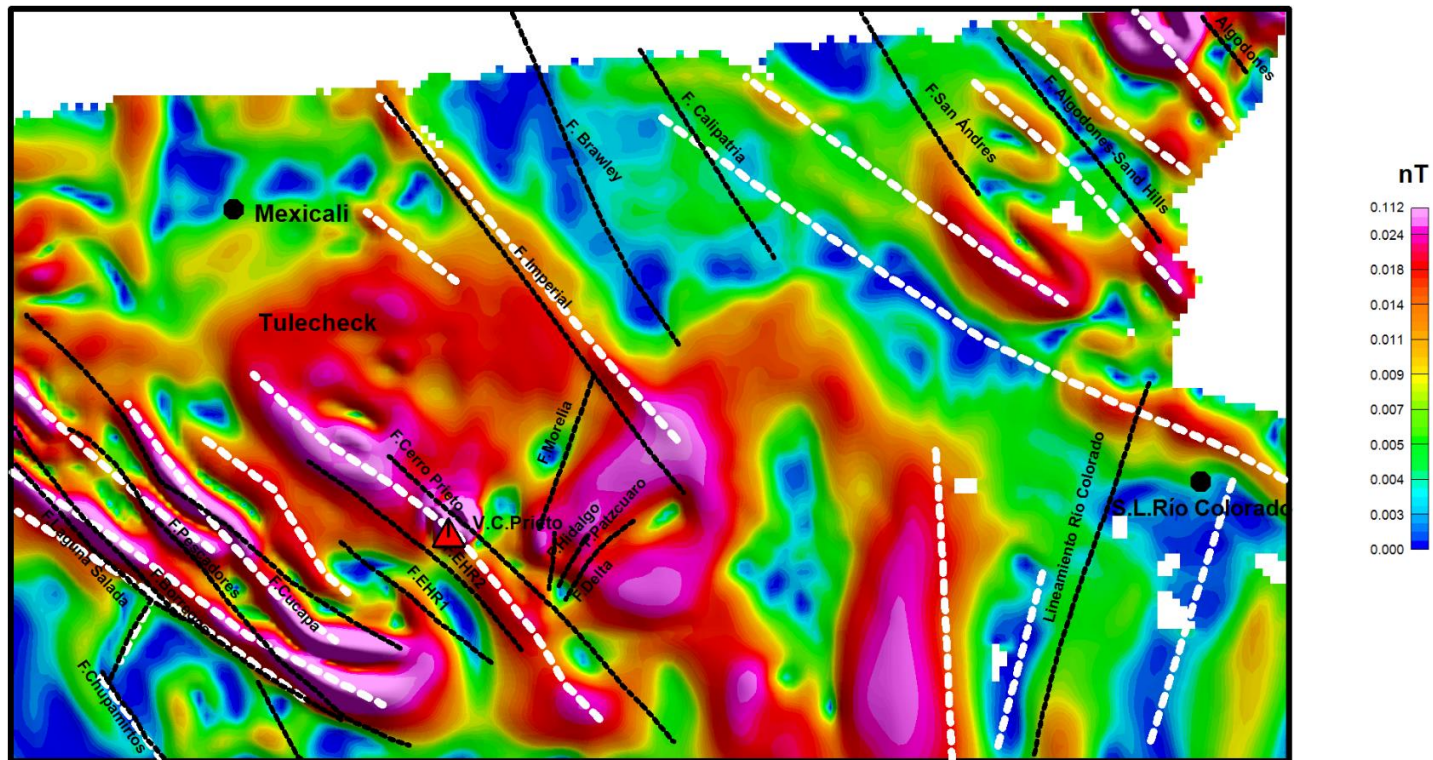
4.2.6 Mapa de Gradiente Horizontal de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo

El gradiente horizontal total se usa como un detector de bordes y contactos para mejorar los resultados. Tiende a aumentar la frecuencia de las anomalías, es decir, es un filtro pasa alto del campo potencial, realzando las fuentes más someras respecto de las profundas (Arecco, Pizarra, & Ruiz, 2014).

En el análisis del mapa de gradiente horizontal de la Intensidad Magnética total Reducida al Polo (Figura 45), se observan que se enfatizaron más los límites de las estructuras de la Sierra Cucapá, Sierra El Mayor y volcán Cerro Prieto, resaltando las zonas donde aflora el basamento y de actividad volcánica.

Hacia el Noreste de Mexicali se observan tres bordes con orientación NW-SE, asociados a las fallas San Andrés, Algodones-Sand Hills y Algodones (Figura 45).

En San Luis Río Colorado se muestran anomalías con cierta tendencia alargada N-S asociados a rocas basales.



Gradiente Horizontal Total de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo

Figura.- 45 Mapa de Gradiente Horizontal Total de la Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se observa el sistema de fallas de la región proyectadas del mapa geológico de Mexicali por SGM y de Anomalía de Bouguer de la zona Aeropuerto Este-San Luis Río Colorado y Tulecheck-Aeropuerto (Fonseca, Díaz. C, Puente, & de la Peña), las cuales son: Falla Chupamirtos, Laguna Salada, Cucupá, Pescadores, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Imperial, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Calipatria, Brawley San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones y el lineamiento Río Colorado (lineamientos blancos punteados) Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo).

4.2.7 Mapa de Señal Analítica de la Intensidad Magnética Reducida al Polo

Matemáticamente el proceso de señal analítica se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las derivadas en las direcciones X, Y, Z (López-Loera & Tristán-González, 2013). Es decir se forma a través de los gradientes horizontal y vertical inherentes a la anomalía. Este método genera una respuesta de forma que depende de la localización del cuerpo en profundidad pero no de la magnetización del mismo. Presenta la anomalía magnética libre de la respuesta debida a la inclinación magnética e independiente a la dirección de cualquier campo potencial. Así que es muy útil para localizar los bordes de las fuentes magnéticas especialmente cuando la magnetización remanente complica la interpretación (Ticó Montes de Oca, 2018).

El proceso matemático de señal analítica se aplicó sobre el campo magnético reducido al polo.

En la zona Suroeste de Mexicali resalta una anomalía alargada con dirección NW-SE asociada a la Sierra Cucapá, Sierra El Mayor y la falla Laguna Salada, con correlacionándose litológicamente con afloramientos graníticos y metasedimentarios (Figura 46).

Por consiguiente con esa misma dirección preferencial se observan dos altos magnéticos, asociados a Cerro Prieto y Tulecheck, en ambas fuentes se definen mejor sus contornos o límites en las tres direcciones (X, Y, Z), la alta respuesta magnética que se observa se relaciona con la composición andesítica-dacítica del volcán Cerro Prieto para el caso de Tulecheck su respuesta es por la similitud litológica con el afloramiento granítico de Sierra Cucapá. Al Sureste de Cerro Prieto se puede ver otro cuerpo con un alto magnético, este cuerpo puede estar relacionado rocas basales.

Hacia la parte Noreste de Mexicali limitando al norte con California (Estados Unidos), se observan unas anomalías con una tendencia lineal y dirección preferencial NW-SE asociados por la cercanía a las fallas San Andrés, Algodones Sand Hills y al lineamiento Algodones

En San Luis Río Colorado se observan anomalías magnéticas con orientación preferencial casi N-S, asociado a rocas basales resultado del tectonismo que se dio

en la cuenca Altar, una de estas anomalías muestra una baja susceptibilidad magnética muy definida definiendo un contacto litológico entre las rocas basales y el depósito sedimentario.

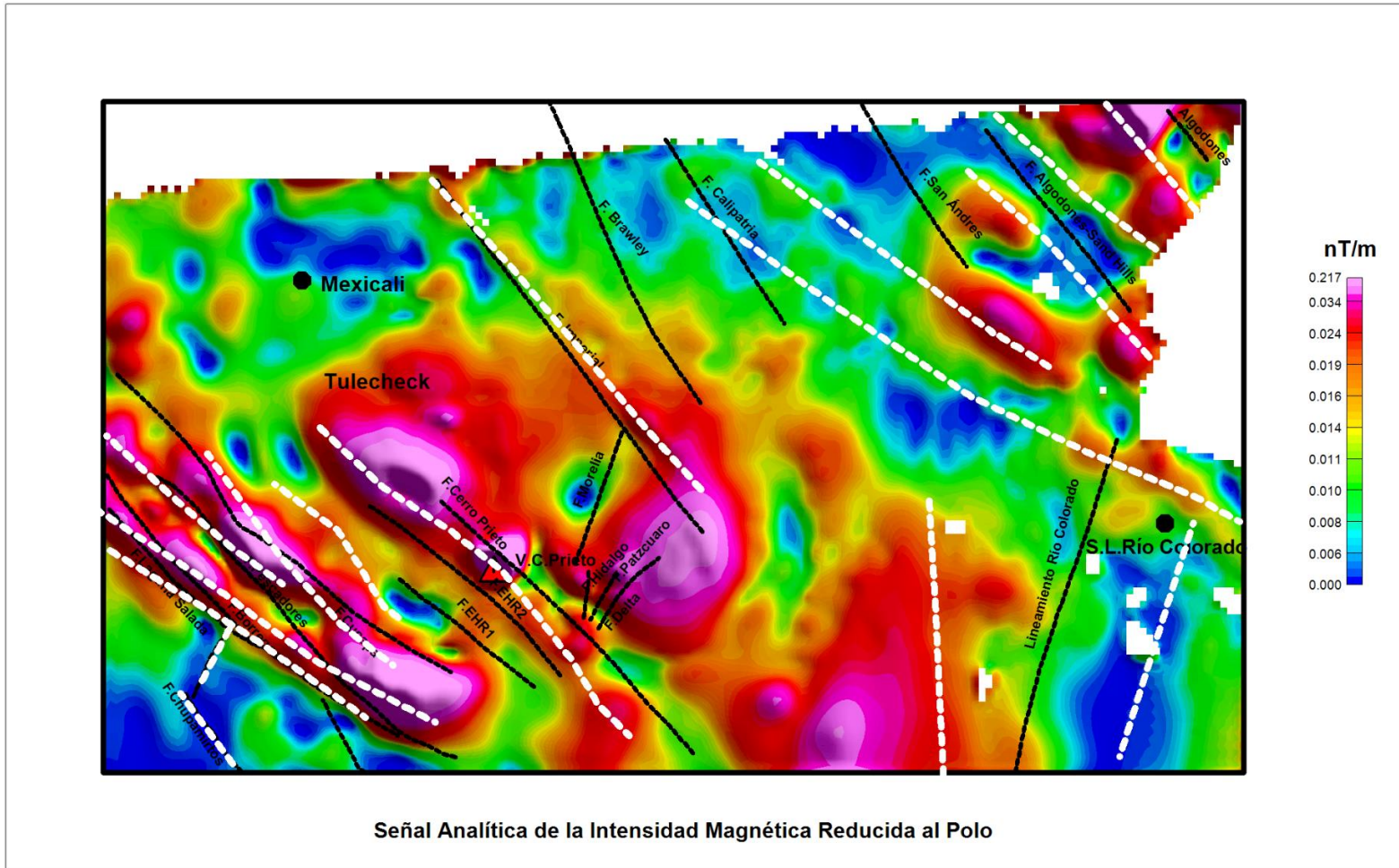


Figura.- 46 Mapa de Primera Señal Analítica de Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se observa el sistema de fallas de la región proyectadas del mapa geológico de Mexicali por SGM y de Anomalía de Bouguer de la zona Aeropuerto Este-San Luis Río Colorado y Tulecheck-Aeropuerto (Fonseca, Díaz, C, Puente, & de la Peña), las cuales son: Falla Chupamirtos, Laguna Salada, Cucapá, Pescadores, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Imperial, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Calipatria, Brawley San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones y el lineamiento Río Colorado (lineamientos negros). Se muestran los lineamientos magnéticos interpretados (líneas blancas punteadas) Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo).

4.3 Interpretación de Mapas Gravimétricos

4.3.1 Mapa de Anomalía de Bouguer

El mapa de anomalía de la Anomalía de Bouguer nos muestra la distribución de déficit o excesos de masas asociadas a las diferentes litologías o estructuras del subsuelo.

Para el análisis del mapa de Anomalía de Bouguer (Figura 47) se definieron tres dominios gravimétricos (líneas punteadas negras):

En el primer dominio (G1) se localiza al Oeste del Volcán Cerro Prieto abarcando este mismo, se visualizan máximos gravimétricos con valores que van de -28 a -11 mGal, estos máximos se asocian a altos contrastes de densidad, cabe mencionar que en toda esta región hay indicios de afloramiento del basamento de composición granítica sobre la Sierra Cucapá, Sierra El Mayor y Tulecheck; también se observa otro cuerpo anómalo en respuesta al volcán Cerro Prieto, conformado por material basáltico y andesítico.

El segundo dominio (G2) está situado en la parte Noreste del Valle de Mexicali extendiéndose hasta San Luis Río Colorado, los altos gravimétricos observados, no tienen una correlación directa con alguna estructura en superficie, sin embargo pueden estar asociados a un levantamiento del basamento granítico provocado por una reactivación en la zona.

El alto gravimétrico de San Luis Río Colorado podría deberse a la densificación hidrotermal suponiendo la infiltración de los acuíferos del Río Colorado en los sedimentos, o ser respuesta de un cuerpo metamórfico sin fuerte magnetismo ya que basándonos en el mapa de intensidad magnética total corresponde a un bajo magnético.

El tercer dominio (G3) ubicado en el valle de Mexicali, se observa una zona con un mínimo gravimétrico con valores que van de -35 a -41 mGal, esta respuesta es corresponde al relleno sedimentario del Valle de Mexicali conformado por material de relleno (conglomerados, arcillas y limos).

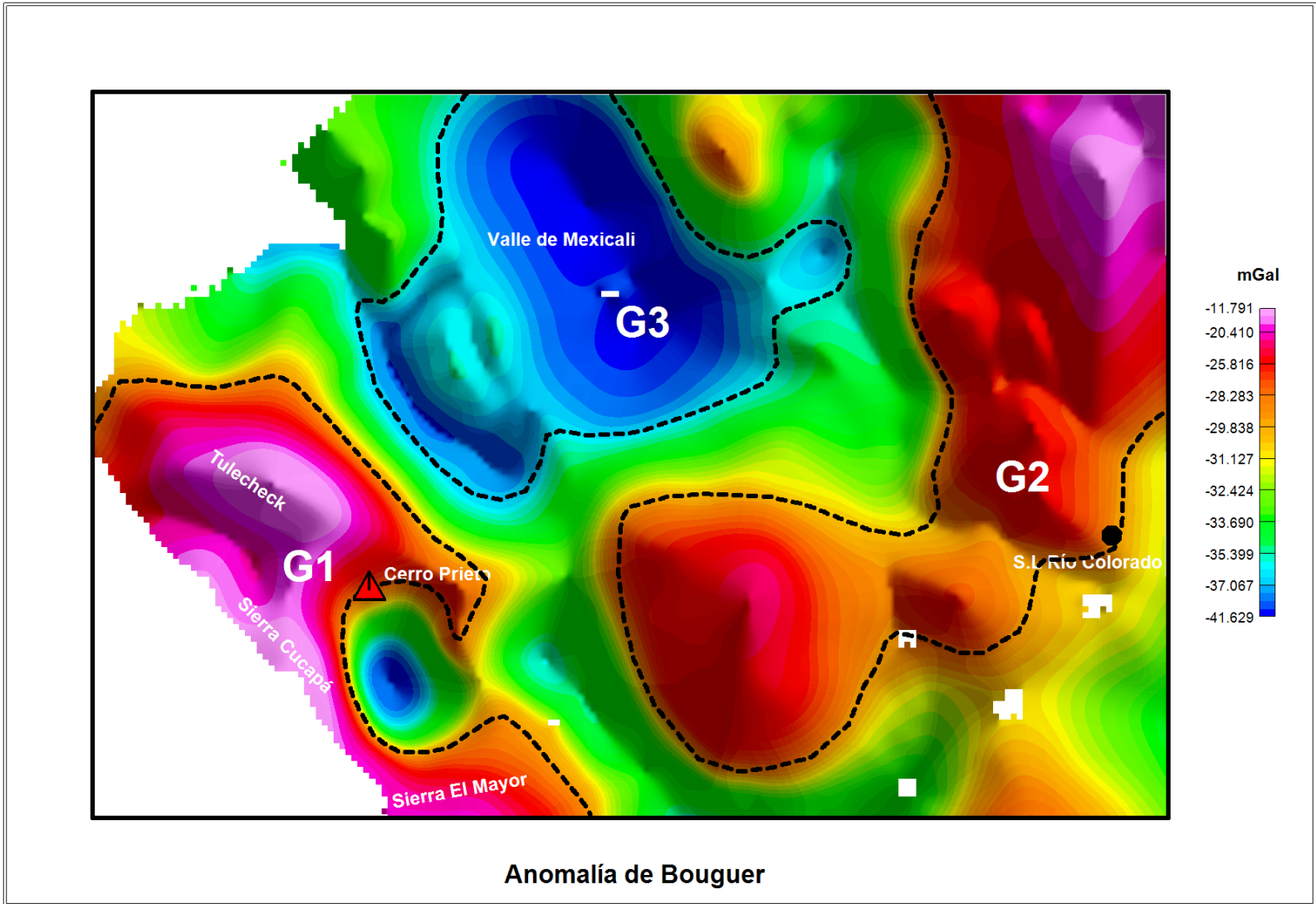


Figura.- 47 Mapa de Anomalía de Bouguer. Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado (punto negro) y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo).

4.3.2 Mapa de Configuración Regional sobre la Anomalía de Bouguer

Para obtener la separación regional sobre la Anomalía de Bouguer se le aplicó el filtro suave que se utiliza frecuentemente como un filtro pasa bajo o pasa alto llamado "Filtro Gaussiano regional/residual" (Jefferson Andrew, 2018) para mejorar la respuesta de fuentes regionales.

Analizando el mapa de configuración regional muestra un comportamiento similar al de la Anomalía de Bouguer, sin embargo las anomalías tienden a ser más amplias. Conserva las mismas tendencias de valores.

Para su interpretación el mapa se dividió en tres zonas (líneas punteadas negras) (Figura 48):

En la zona R1 se observan un rango de valores que va de -27 a -20 mGal, correspondiente a una anomalía que abarca Sierra Cucapá, Sierra El Mayor, el volcán Cerro Prieto y Tulecheck, estos altos gravimétricos se asocian al afloramiento del basamento de origen granítico y a la actividad volcánica de Cerro Prieto.

Hacia el Noreste del Valle de Mexicali extendiéndose hasta San Luis Río Colorado se encuentra la zona R2, el alto gravimétrico observado tiene un intervalo de -20 a -29 mGal muy parecidos a los de R1, relacionado con altos contrastes de densidad derivado del levantamiento de los bloques del basamento granítico y en el caso de San Luis Río Colorado a la densificación de sedimentos como resultado de la saturación de estos por los acuíferos presentes en la zona.

Sobre el Valle de Mexicali se ubica la zona R3 donde se distingue un bajo gravimétrico con una orientación NW-SE, asociado a bajos contrastes de densidad que tiene origen en los sedimentos depositados (conglomerados, arcillas y limos), que en su mayoría no están consolidados.

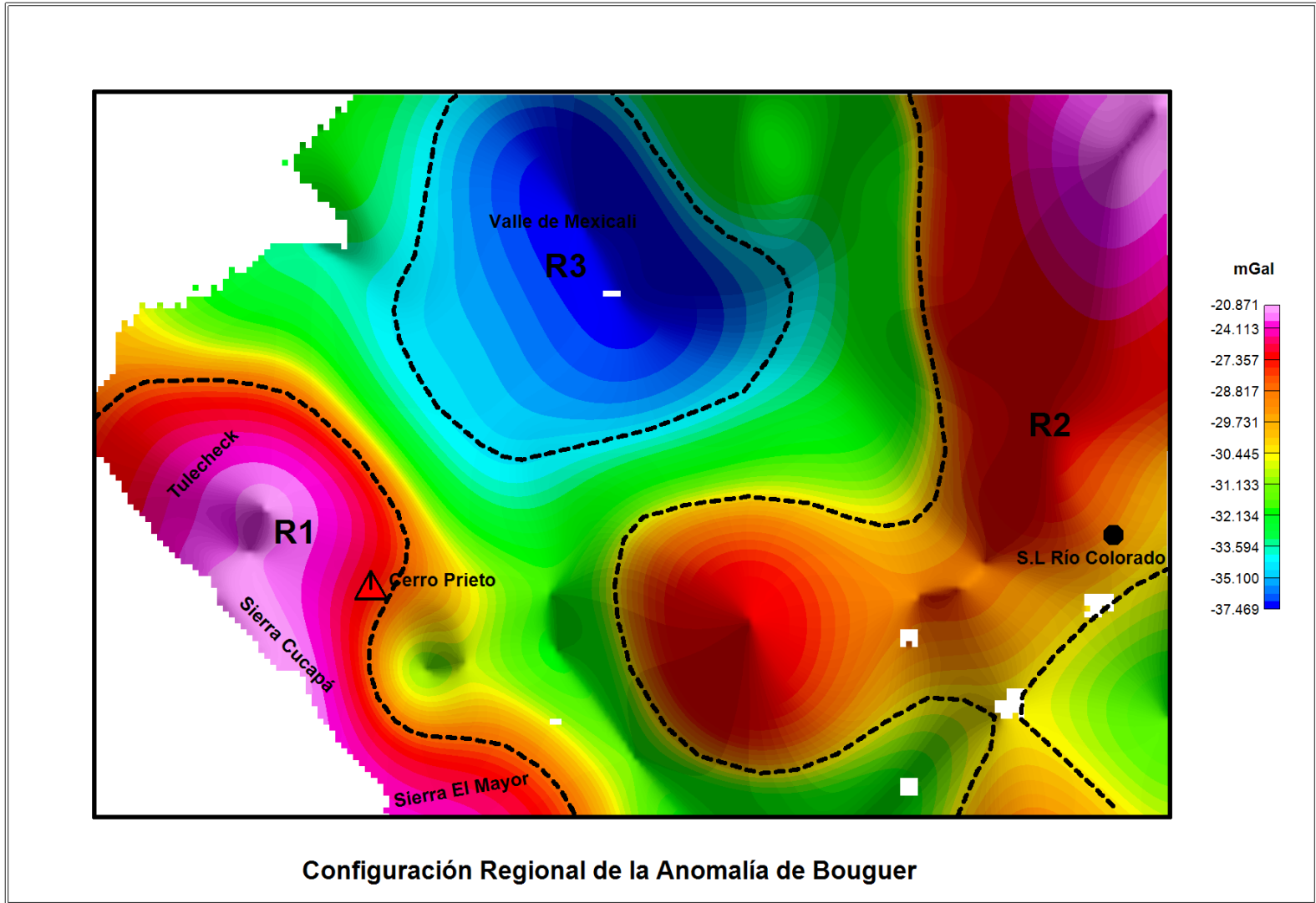


Figura.- 48 Mapa de Configuración Regional de la Anomalía de Bouguer. Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado (punto negro) y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo).

4.3.3 Mapa de Configuración Residual de la Anomalía de Bouguer

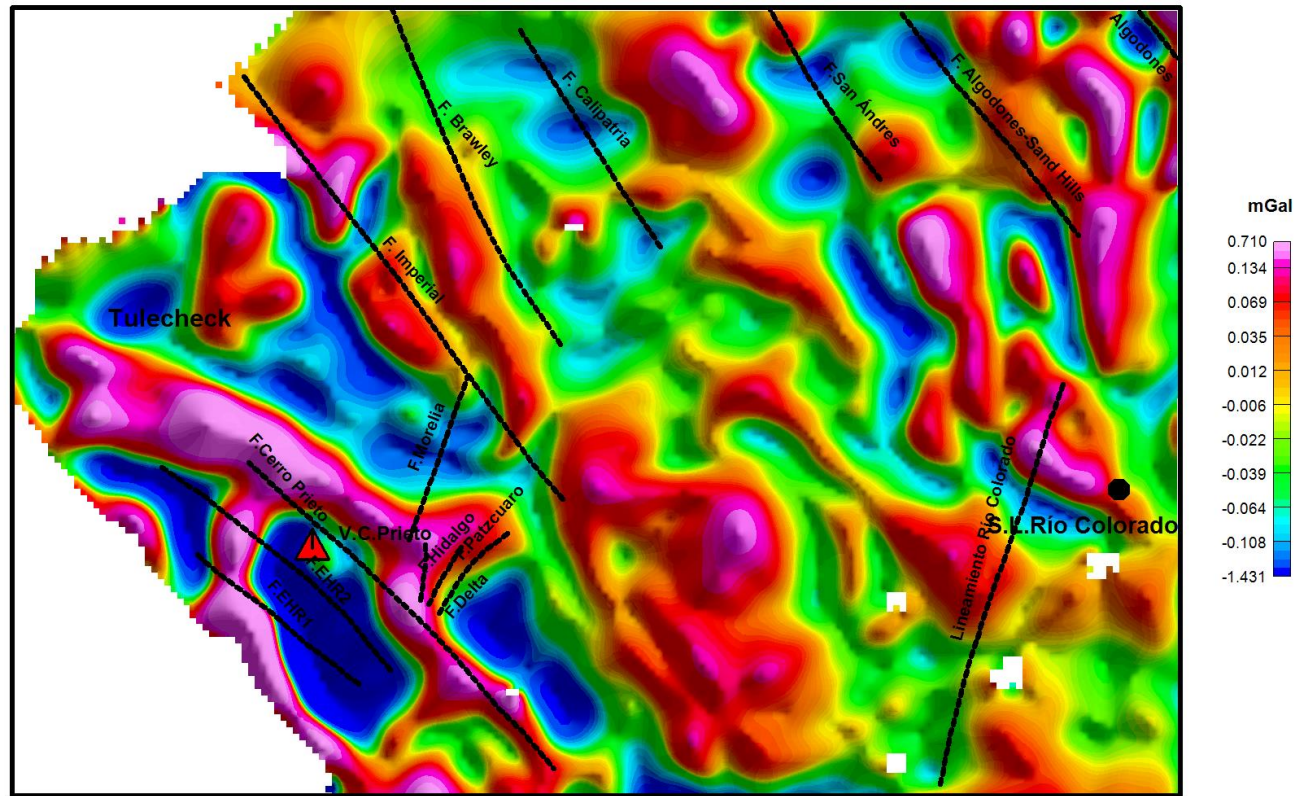
El proceso matemático de configuración residual es aplicado para objetivos someros de onda corta.

Para obtener el mapa de configuración residual sobre Anomalía de Bouguer se aplico un filtro suave que se utiliza frecuentemente como un filtro pasa bajo o pasa alto llamado "Filtro Gaussiano regional/residual" (Jefferson Andrew, 2018).

Se pueden observar anomalías residuales que se alinean de manera general en una dirección preferencial NW-SE. Las anomalías gravimétricas con valores máximos se presentan principalmente al Oeste, abarcando la Sierra Cucapá, Sierra El Mayor y el complejo volcánico Cerro Prieto (Figura 49), debido a que son cuerpos someros, su alta respuesta es resultado del afloramiento del basamento de composición litológica de granodiorita, tonalita, esquisto y mármol para el caso de las Sierras anteriormente mencionadas y a la actividad volcánica de Cerro Prieto de composición Basáltica-andesítica.

En la zona de San Luis Río Colorado se observan anomalías gravimétricas asociadas a fuertes contrastes de densidad como resultado de estructuras someras con dirección NW-SE, esto puede deberse a la cercanía de las fallas donde hubo una fuerte actividad tectónica pero esos posibles cuerpos fueron sepultados por los sedimentos, razón por la cual no afloran.

Hacia la región Mexicali-Algodones se observan altos gravimétricos, asociadas al posible levantamiento de los bloques del basamento o a rocas basales sepultadas por los depósitos sedimentarios.



Configuración Residual de la Anomalia de Bouguer

Figura.- 49 Mapa de Configuración Residual de la Anomalia de Bouguer. Se observa el sistema de fallas de la región proyectadas del mapa geológico de Mexicali por SGM y de Anomalia de Bouguer de la zona Aeropuerto Este-San Luis Río Colorado y Tulecheck-Aeropuerto (Fonseca, Díaz, C, Puente, & de la Peña), las cuales son: Falla Chupamirtos, Laguna Salada, Cucapá, Pescadores, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Imperial, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Calipatria, Browley San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones y el lineamiento Río Colorado (lineamientos negros). Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado y el Volcán Cerro Prieto (triangulo rojo).

4.3.4 Mapa de Derivada Vertical de la Anomalía de Bouguer

La primera derivada vertical es usualmente aplicada a los datos de campo gravimétrico para resaltar las anomalías que están asociadas a fuentes geológicas someras y así resaltar los bordes, es decir se realzan anomalías de longitud de onda corta y desprecia las anomalías de longitud de onda larga.

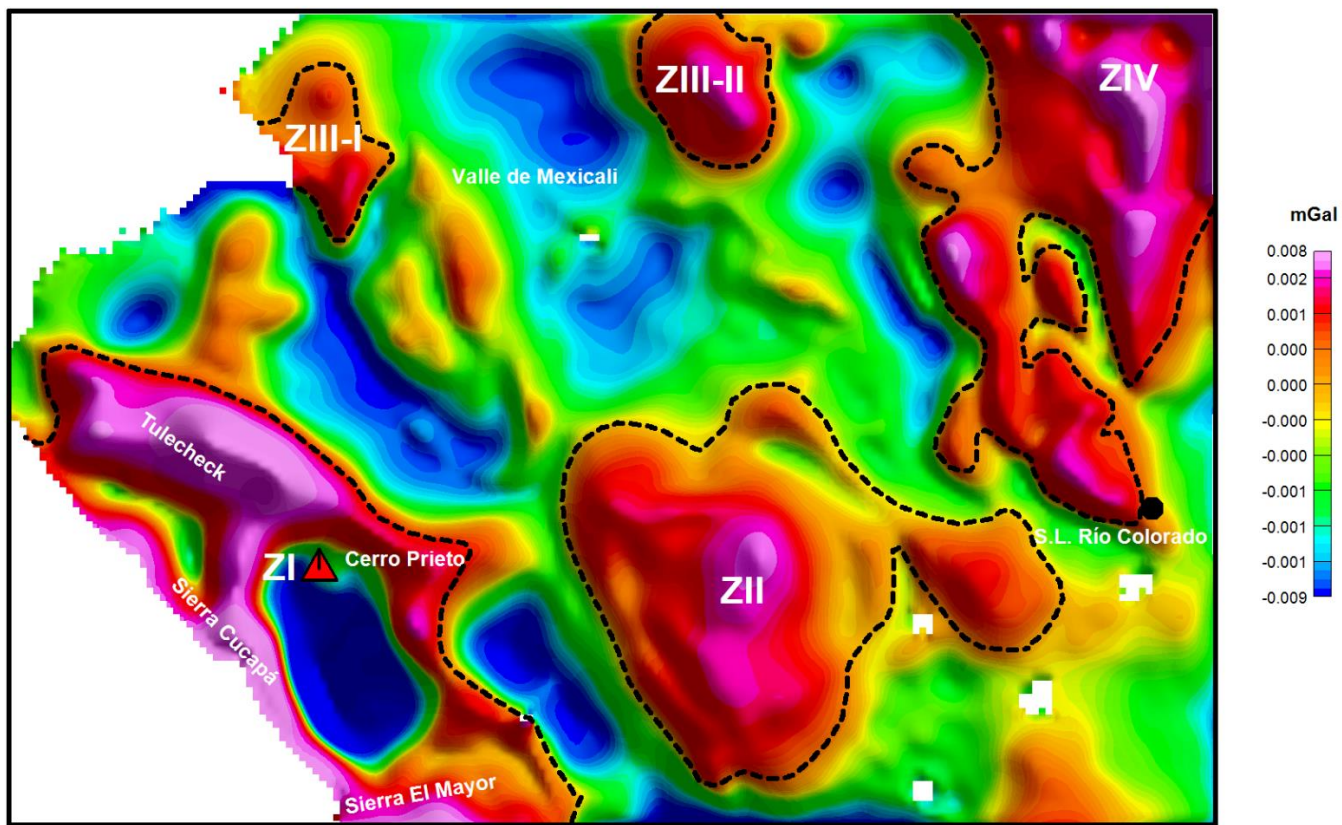
En el mapa de derivada vertical se resaltan las anomalías superficiales con altos contrastes de densidades (Figura 50):

Se observa en la región ZI (líneas punteadas negras) anomalías de alta frecuencia asociadas a la Sierra Cucapá, Sierra El Mayor, Tulecheck debido a que el basamento de composición granítica se encuentra aflorando dando como resultado esta respuesta. En el volcán Cerro Prieto se muestra bajo contraste de densidad y se interpreta que hay una raíz isostática con un alto contraste de densidad debajo de ella compensando el efecto somero de la densidad.

En la zona ZII (líneas punteadas negras) localizada al Oeste de San Luis Río Colorado, se resalta un alto contraste de densidad resultado de una densificación termal, tomando en cuenta que se han hecho estudios geoquímicos en esa región.

En el Valle de Mexicali se visualizan dos anomalías ZIII-I y ZIII-II (líneas punteadas negras), su respuesta es asociada a la densificación termal como en el caso de la zona ZII ya que se ha detectado la presencia de temperaturas superiores a la normal en pozos construidos para riego documentado por Fonseca, Puente y Díaz.

Hacia el Este se tiene la presencia de una anomalía ZIV (líneas punteadas negras) que se extiende hasta San Luis Río Colorado, este alto contraste de densidad se relaciona con rocas basales sepultadas por el relleno sedimentario aunque también las rocas sedimentarias pueden estar influyendo ya que pueden estar más consolidadas en esta región.



Derivada Vertical de la Anomalia de Bouguer

Figura.- 50 Mapa de Derivada Vertical de la Anomalia de Bouguer. Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo).

4.4.5 Mapa de Gradiente Horizontal Total de la Anomalía de Bouguer

El gradiente horizontal total se usa como un detector de bordes y contactos para mejorar los resultados. Este filtro es independiente del rumbo de las fuentes que provocan las anomalías, resaltando las fuentes más someras respecto a las profundas (Arecco, Pizarra, & Ruiz, 2014).

En el análisis del mapa de gradiente horizontal total (Figura 51), se observan que los bordes de la Sierra Cucapá, Sierra El Mayor y Tulecheck se enfatizaron más, este alto contraste de densidades responden al afloramiento del basamento en esa región.

En el Valle de Mexicali, se observa una anomalía gravimétrica mejor definida, con orientación NW-SE. Posteriormente adentrándose hacia la zona de Mexicali-Algodones se van apreciando más altos gravimétricos mejor definidos con una orientación NW-SE (Figura 50), sin embargo con una inclinación menor en comparación a la orientación predominante en el área, relacionados a sedimentos más consolidados o a posibles rocas basales sepultadas por el relleno sedimentario. Hacia San Luis Río Colorado se muestran anomalías con cierta tendencia alargada, esa respuesta se debe a posibles intrusivos o a la densificación de sedimentos.

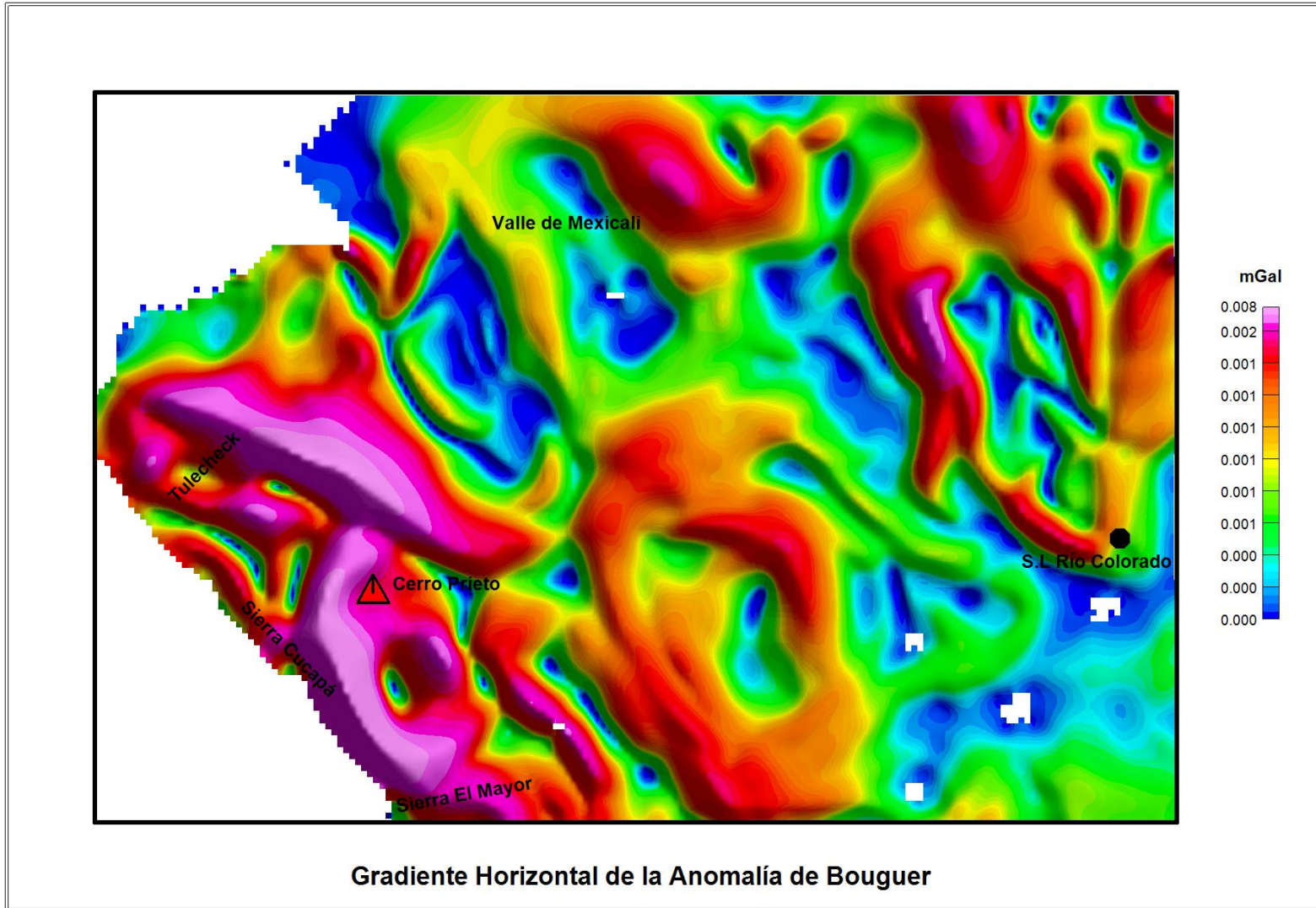


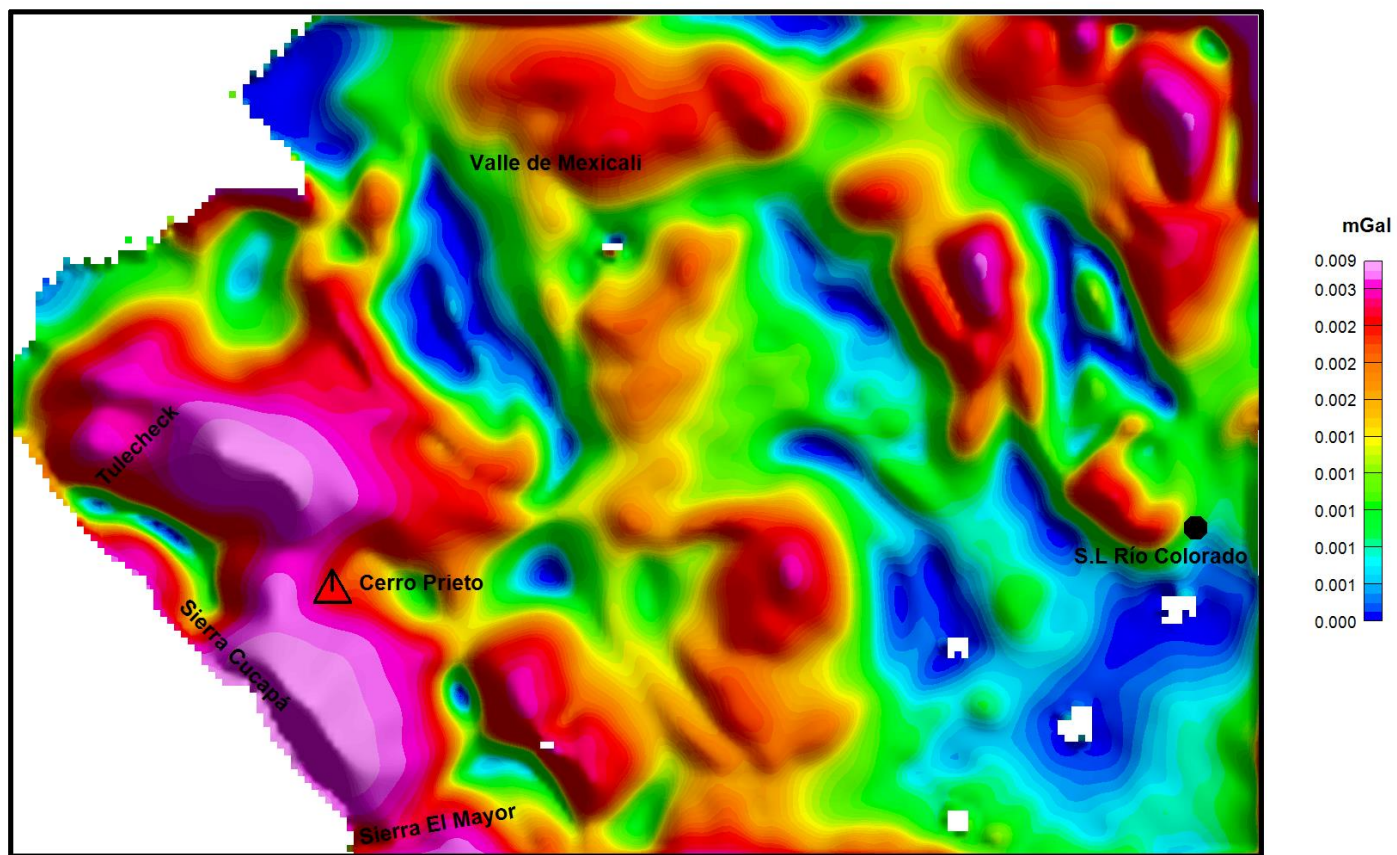
Figura.- 51 Mapa de Gradiente Horizontal Total de la Anomalía de Bouguer. Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo).

4.4.6 Mapa de Señal Analítica de Anomalía de Bouguer

El proceso matemático de señal analítica, resalta los gradientes de la zona de estudio; así mismo resalta bordes de las anomalías con contenido principal de materiales altamente densos. Es decir la señal analítica es una sumatoria cuadrática de los gradientes en sus 3 componentes que concentra y delimita los cambios.

En el mapa de configuración de señal analítica sobre la Anomalía de Bouguer, se puede observar un alto contraste de densidades al Oeste del Volcán Cerro Prieto, toda esa franja con orientación NW-SE abarca la Sierra Cucapá, Sierra El mayor, mostrando un fuerte contraste de densidad debido a que aflora el basamento de composición granítica, como algunos afloramientos metamórficos.

Hacia el extremo noreste del Valle de Mexicali, se observa un alto contraste que corresponde a posibles intrusivos ígneos y metamórficos que aún no afloran (Figura 52), aunque la unidad sedimentaria en esa zona puede tener más compactación provocando esta respuesta de densificación. También se resaltan pequeños contrastes en la zona San Luis Río Colorado y Valle de Mexicali, cabe mencionar que en estas áreas se encuentran depósitos de baja compactación (litología) y alto contenido de saturación, suponiendo la infiltración de los acuíferos del Río Colorado en los sedimentos.



Señal Analítica de la Anomalía de Bouguer

Figura.- 52 Mapa de Señal Analítica de Anomalía de Bouguer. Se visualizan las localidades principales: San Luis Río Colorado y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo).

4.5 Modelado Magnético y Gravimétrico 2D

Se realizaron cuatro modelos 2D mediante la plataforma GM-SYS de Oasis Montaj, integrando datos magnéticos, gravimétricos, geológicos (Falla Cucapá, Pescadores, Laguna Salada, Chupamirtos, Borregos, EHR1, EHR2, Cerro Prieto, Morelia, Hidalgo, Patzcuaro, Delta, Imperial, Brawley, Calipatria, San Andrés, Algodones-Sand Hills, Algodones (lineamientos negros) (Figura 53) e información de pozos (puntos azules). Como parámetros de entrada se incluyeron los datos de elevación (Grid Modelo Digital de Elevación) y la profundidad de la base de la fuente magnética, obtenida de la publicación de Ikediobi, 2013. Los perfiles modelados están ubicados desde la zona de Laguna Salada hasta la región de Los Algodones. Distribuidos sobre el mapa de intensidad magnética total reducida al polo (Figura 53).

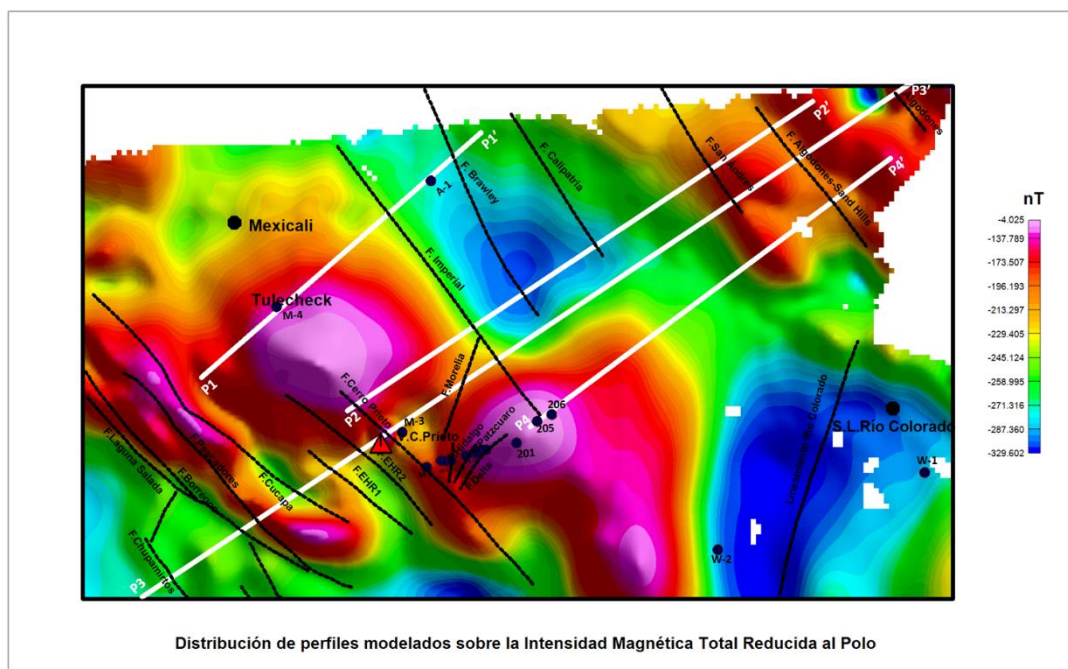


Figura.- 53 Distribución de perfiles modelados sobre el mapa de Intensidad Magnética Total Reducida al Polo. Se observan las localidades principales: San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos negros) y el Volcán Cerro Prieto (triángulo rojo).

Empleando el algoritmo de Talwani, se ajustaron por inversión las características físicas y geométricas de las fuentes que provocan las anomalías.

Cada modelo propuesto cuenta con 3 capas o unidades litológicas: Manto, Unidad 1- Basamento, Unidad 2- Sedimentos consolidados y Unidad 3-Sedimentos no consolidados-semiconsolidados.

La cima del manto o base del basamento inicia a una profundidad de 15 Km al Oeste iniciando en Laguna Salada hasta Cerro Prieto, hacia el Este llegando al poblado Vicente Guerrero la profundidad aumenta a 20 Km, estos datos fueron obtenidos del modelo (Figura 10) propuesto por Ikediobi, 2013. El valor de la susceptibilidad del manto se estableció en cero unidades CGS debido a que el límite de la corteza y el manto está marcado por la temperatura de Curie, así que los elementos ferromagnéticos pierden sus propiedades magnéticas. La densidad propuesta para el manto fue de 3.3 gr/cm³.

4.5.1 Perfil 1 Tulecheck-Brawley

Este perfil (Figura 54) se ubica al extremo Oeste del área de estudio, inicia en la región de Tulecheck y se extiende al Noreste hacia el Valle de Mexicali, con una extensión de 37.800 Km. En este modelo se integraron datos sísmicos debido a que el perfil coincide con una línea sísmica de reflexión (Figura 11). Así que se proyectaron las fallas interpretadas en la sección sísmica (Figura 11) dichas fallas son: Falla Michoacán e Imperial y se le agregó una tercera falla que no aparece en la sección sísmica, sin embargo pasa por esta misma, llamada Brawley. También se tomo la información de dos pozos (M-4 y A-1) como apoyo para conocer el espesor de la unidad de sedimentos no consolidados y consolidados.

La primera unidad está formada por rocas graníticas, prolongación de las rocas aflorantes sobre las Sierras Cucapá y El Mayor a profundidad. Se observa un alto magnético de importancia situado al Oeste del perfil donde hay un levantamiento de basamento, posteriormente al llegar a la falla Michoacán hay una caída del bloque del basamento hasta 6000 metros extendiéndose hasta la falla Imperial donde comienza un levantamiento del basamento debido a la deformación transferida del sistema de Fallas San Andrés Esta unidad fue modelada con rangos de susceptibilidad de 0.002-0.0042 (CGS). La extensión y geometría de las estructuras para la carpeta sedimentaria se tomaron de los pozos (M-4 y A-1) anteriormente mencionados y para el basamento se plantearon de acuerdo al modelo regional

propuesto por Ikediobi, 2013 y a la variación de los valores de susceptibilidad para lograr un ajuste aproximado en la curva magnética observada. Las densidades de esta unidad fueron más altas por la compactación de éstas rocas, su rango varió de 2.69 a 2.71 gr/cm³.

La segunda unidad está constituida por depósitos de lutitas grises con intercalaciones de areniscas, (debido a sus propiedades de permeabilidad y porosidad pueden almacenar fluidos geotérmicos), lutitas límoníticas y lutitas cafés, las cuales se depositaron sobre el basamento granítico, su espesor aumenta hasta 6000 metros hasta la falla Imperial; con base en lo mencionado de la primera unidad hay un levantamiento de bloques, disminuyendo su espesor hasta 1100 metros hacia la parte Este del perfil. Las densidades de éstas rocas varían entre 2.4-2.55 gr/cm³. Las densidades fueron más altas debido al hidrotermalismo presente en la zona, provocando una densificación en los sedimentos. Los valores de susceptibilidad para esta carpeta sedimentaria se plantearon en cero unidades CGS debido al mínimo contenido de elementos ferromagnesianos.

La tercera unidad está integrada por depósitos no consolidados y semiconsolidados, constituidos por arcillas, limos, arenas y gravas. En el lado Oeste del perfil su espesor es menor y va en aumento de 80 a 2200 metros hasta llegar a la falla Imperial, por consiguiente empieza a disminuir el espesor por el levantamiento de bloques quedando con un espesor de 1500 m. Las densidades de esta carpeta sedimentaria van de 2.0-2.14 gr/cm³.

Perfil Tulecheck-Brawley (P1-P1')

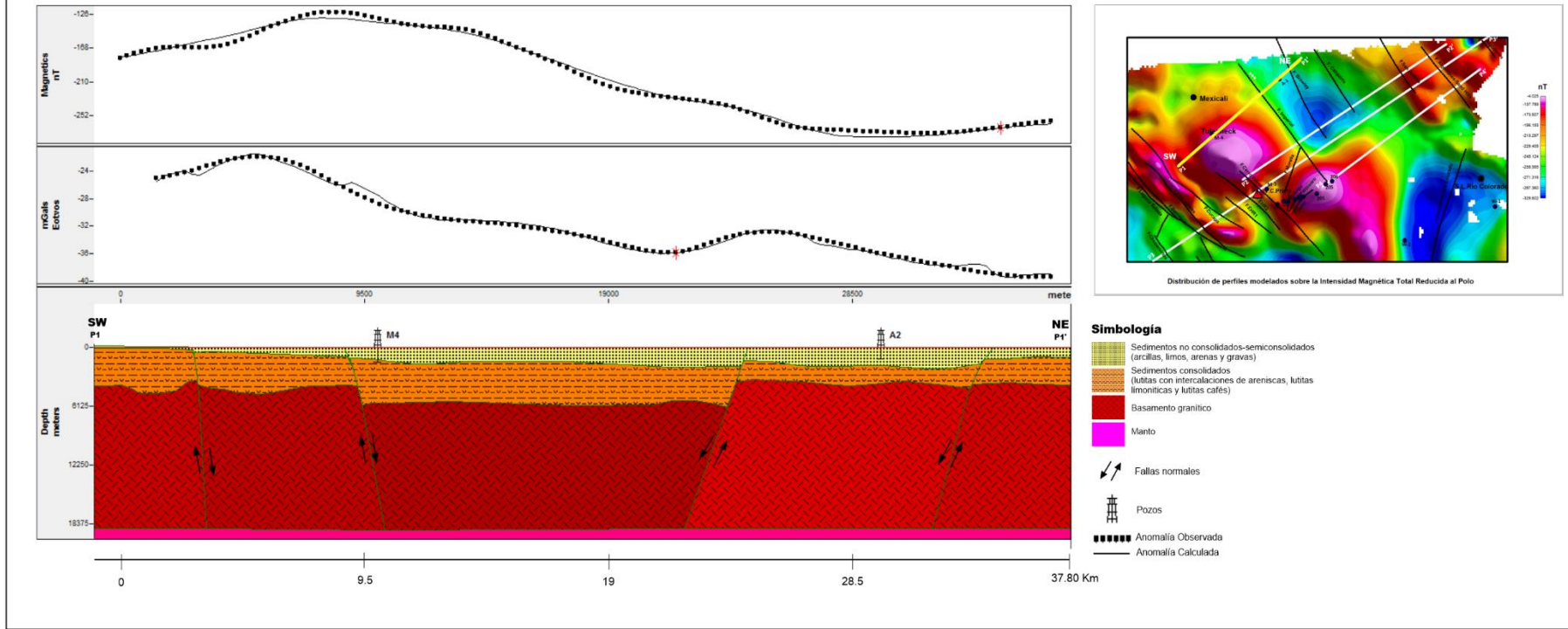


Figura.- 54 Modelo magnético y gravimétrico del Perfil Tulecheck-Brawley (P1-P1').

4.5.2 Perfil 2 Cerro Prieto-Algodones

Este perfil (Figura 55) se localiza al extremo Oeste de la región de estudio, iniciando al Noreste del Volcán Cerro Prieto y extendiéndose hacia la región de Los Algodones con una extensión de 54.980 Km.

En este modelo se proyectaron las siguientes fallas: falla Cerro Prieto, Imperial, Brawley, Calipatria, San Andrés y Algodones Sand Hills. Por la cercanía del pozo M-3, se tomo la información de los espesores para la carpeta sedimentaria y la cima del basamento para el lado Oeste del perfil y para el lado Este se tomo de referencia el modelo regional de Ikediobi, 2013.

La primera Unidad correspondiente al basamento la cual está formada por rocas graníticas, las extensión y la geometría de las estructuras se modelaron con un rango de susceptibilidad magnética de 0.0009-0.0038 (CGS). Se observan tres altos magnéticos significativos: el primer alto magnético corresponde a la zona de dispersión donde se formo el Volcán Cerro Prieto, ya que por la cercanía tenemos una alta respuesta magnética. El segundo y tercer alto magnético situados al Este del modelo es debido al levantamiento de los bloques del basamento, los cuales tienen un alto contenido de elementos ferromagnesianos. Las densidades de estas rocas graníticas tienen un rango de 2.69 a 2.77 gr/cm³.

La segunda unidad está compuesta de depósitos consolidados (Lutitas grises con intercalaciones de areniscas, lutitas limoníticas y lutitas cafés) las cuales tienen una permeabilidad y porosidad que permite el almacenamiento de fluidos. El espesor de esta capa va aumentando en un rango de 400 a 6000 metros hasta llegar a la falla Imperial, hacia el Este empieza a disminuir el espesor de esta unidad hasta llegar a los 450 metros. La densidad de estas rocas va de 2.48 a 2.61 gr/cm³.

La tercera unidad se conforma de rocas no consolidadas y semiconsolidadas (arcillas, limos, arenas y gravas). En el lado Oeste del perfil su espesor va en aumento de 500 a 2000 metros hasta llegar a la zona de dispersión hacia el Este el espesor de esta carpeta sedimentaria disminuye hasta 400 metros.

Perfil Cerro Prieto-Algodones (P2-P2')

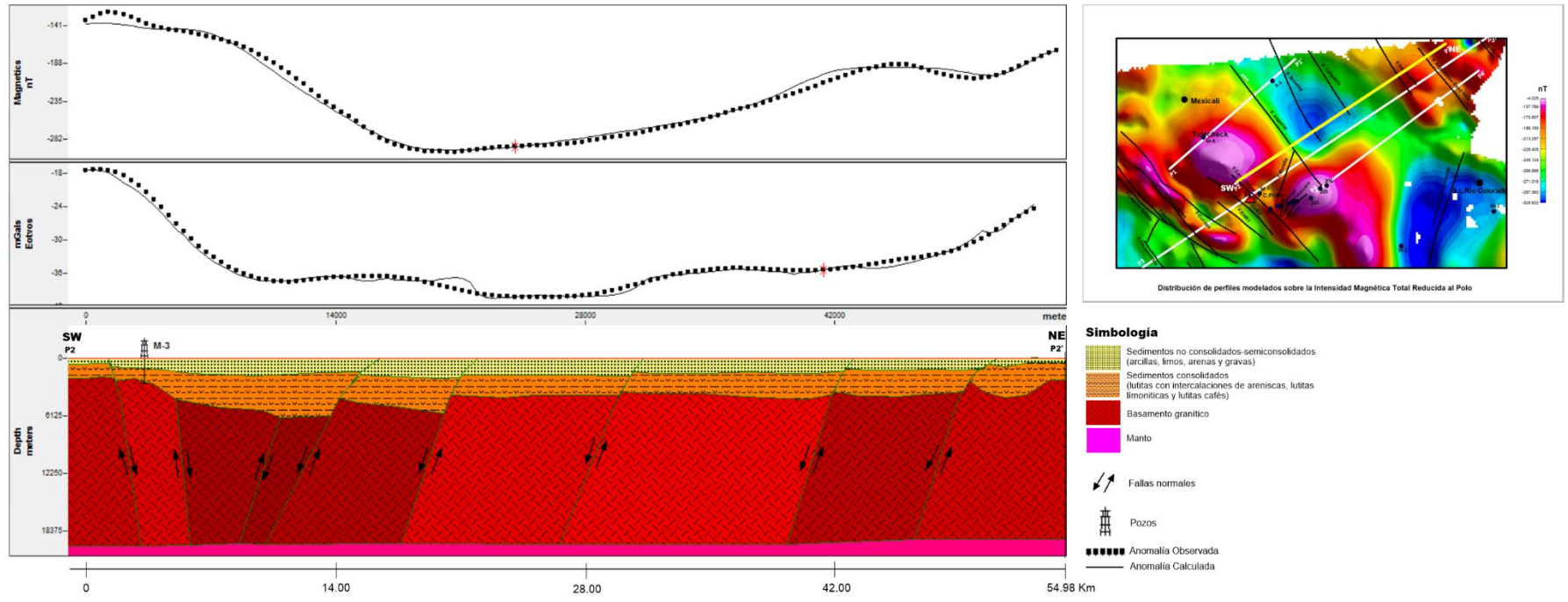


Figura.- 55 Modelo magnético y gravimétrico del Perfil Cerro Prieto-Algodones (P2-P2').

4.5.3 Perfil 3 Laguna Salada-Algodones

Este perfil situado al extremo Oeste del área de estudio, inicia en la región de Laguna Salada y se extiende al Noreste hacia el poblado Vicente Guerrero o mejor conocido como Los Algodones, tiene una extensión de 90.280 Km. La primera parte del Modelo que abarca desde Laguna Salada hasta el complejo volcánico Cerro Prieto fue tomado de un modelo previo (Anexo 3) elaborado por el Servicio Geológico Mexicano, se proyectaron las fallas caracterizadas del mapa geológico de Mexicali, dichas fallas son: Falla Chupamirtos, Laguna Salada, Pescadores, Cucapá, Cerro Prieto, EHR1 y EHR2, éstas dos últimas fallas fueron nombradas así con fines prácticos por su cercanía al Ejido Hipólito Rentería ya que en el mapa geológico de Mexicali no mencionan sus respectivos nombres.

La parte complementaria del Modelo es la continuación del complejo volcánico Cerro Prieto hasta la región de Los Algodones, se propuso a partir de la recopilación de información previa: proyecciones de pozos y modelos regionales, debido a que no se encontró información cercana en ese sitio. En este modelo también se presencia las fallas Imperial, San Andrés, Sand Hills y Algodones.

La primera unidad está formada por rocas graníticas del Cretácico, rocas metamórficas del Paleozoico-Mesozoico e intrusiones con una posible edad del Terciario Superior-Plioceno. Se observan cuatro altos magnéticos: El primero alto magnético se ubica al Oeste del perfil donde hay un afloramiento del basamento situado en la Sierra Cucapá, el segundo alto magnético de importancia se relaciona con el Volcán Cerro Prieto, el tercero y cuarto alto magnético ubicados en el lado Este del perfil por la zona de Mexicali-Algodones, donde se observa un levantamiento del basamento dando está respuesta magnética. Esta unidad fue modelada con rangos de susceptibilidad de 0.001-0.0044 (CGS). La extensión y geometría de las estructuras modeladas posteriores a la falla Imperial se propusieron de acuerdo al modelo regional propuesto por Ikediobi, 2013 y a la variación de los valores de susceptibilidad para lograr un ajuste aproximado en la curva magnética observada en la región de Mexicali-Algodones. Las densidades de esta unidad fueron más altas por la compactación de éstas rocas, su rango varió de 2.69-2.8 gr/cm³.

La segunda unidad está constituida por depósitos de lutitas grises con intercalaciones de areniscas, (las cuales son permeables y porosas por lo que alojan los fluidos del yacimiento geotérmico), lutitas limoníticas y lutitas cafés, las cuales sobreyacen sobre el basamento granítico e intrusivo, su espesor aumenta hasta 5200 metros sobre la fosa tectónica; con base en lo mencionado de la primera unidad hay un levantamiento de bloques, disminuyendo su espesor hasta 1200 metros hacia la parte Este del perfil. Las densidades de estas rocas son 2.4-2.62 gr/cm³. Los valores de susceptibilidad para esta carpeta sedimentaria se establecieron en cero unidades CGS debido al pobre contenido de elementos ferromagnesianos.

La tercera unidad está compuesta por depósitos no consolidados y semiconsolidados, constituidos por arcillas, limos, arenas y gravas. En el lado Oeste del perfil su espesor va en aumento de 400 a 1400 metros hasta llegar al volcán Cerro Prieto, este volcán está sobre un centro de dispersión resultado de la evolución tectónica por lo que hay una caída de bloques hacia la falla Imperial, aumentando su espesor hasta 2000 metros. Hacia el Este hay un levantamiento de bloques debido a la deformación transferida a través del sistema de fallas San Andrés por lo que en la unidad sedimentaria se empieza a ver una disminución en su espesor aproximado de 800 m al lado Este del perfil. La densidad promedio utilizada para esta unidad fue de 2-2.3 g/cm³ por su baja compactación. La susceptibilidad magnética de este tipo de sedimentos es despreciable debido a la ausencia de contenido de elementos ferromagnesianos en su composición, así que en el modelo se estableció en cero unidades CGS, para esta unidad. Esta capa se representa en el modelo en color amarillo (Figura 56).

Perfil Laguna Salada-Algodones (P3-P3')

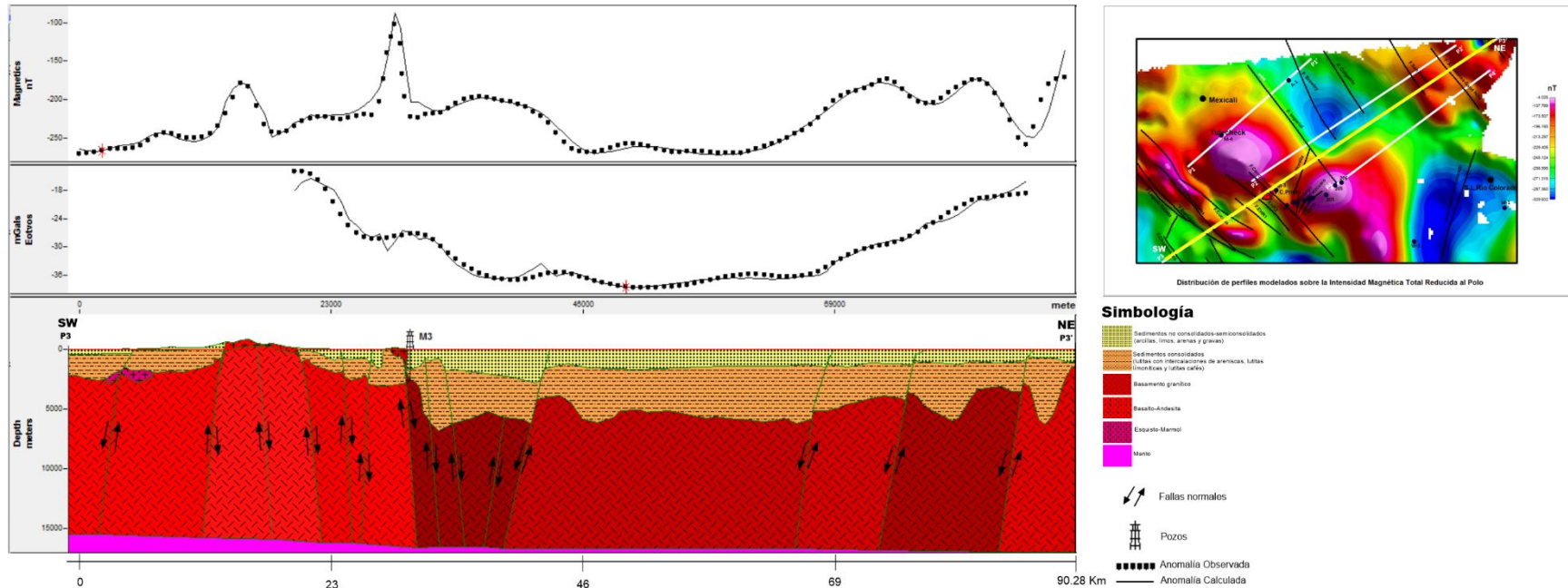


Figura.- 56 Modelo magnético y gravimétrico del Perfil Laguna Salada-Algodones (P3-P3').

4.5.4 Perfil 4 Imperial-Algodones

Este perfil se localiza al extremo Oeste, iniciando en el área de la falla Imperial extendiéndose hacia la región de Los Algodones con una extensión de 44.057 Km. En este modelo se proyectaron las siguientes fallas: falla Imperial, San Andrés y Algodones Sand Hills. Este modelo pasa por los pozos (205 y 206) así que se tomo la información de los espesores para la carpeta sedimentaria ubicada al lado Oeste, para la capa sedimentaria del extremo Este y la cima del basamento se tomo de referencia el modelo regional de Ikediobi, 2013.

La primera Unidad correspondiente al basamento la cual está formada por rocas graníticas, la geometría de las estructuras se modelaron y se ajustaron con un rango de susceptibilidad magnética de 0.001-0.0037 (CGS). Se observan tres altos magnéticos significativos: el primer alto magnético corresponde a la zona de dispersión cercana a la falla Imperial donde se observa una alta respuesta magnética significativa. El segundo y tercer alto magnético situados al Este del modelo es debido al levantamiento de los bloques del basamento, los cuales tienen un alto contenido de elementos ferromagnesianos. Las densidades de estas rocas graníticas tienen un rango de 2.69 a 2.75 gr/cm³.

La segunda unidad está compuesta de depósitos consolidados (Lutitas grises con intercalaciones de areniscas, lutitas limoníticas y lutitas cafés) las cuales tienen una permeabilidad y porosidad que permite el almacenamiento de fluidos. Hacia el Oeste el espesor de esta capa aumentando hasta 6000 metros hasta llegar a la Falla Imperial, hacia el Este empieza a disminuir el espesor de esta unidad hasta llegar a los 2000 metros. La densidad de estas rocas va de 2.55-2.6 gr/cm³.

La tercera unidad se conforma de rocas no consolidadas y semiconsolidadas (arcillas, limos, arenas y gravas). En el lado Oeste del perfil su espesor aumenta hasta 2250 metros hasta llegar a la zona de la Falla Imperial con base en los pozos (205-206), hacia el Este el espesor de esta carpeta sedimentaria disminuye hasta 900 metros. Las densidades de estas rocas tienen un rango de 2.08-2.18 gr/cm³, así que se tiene un bajo contraste de densidades hacia el Oeste del modelo (Figura 57).

Perfil Imperial-Algodones (P4-P4')

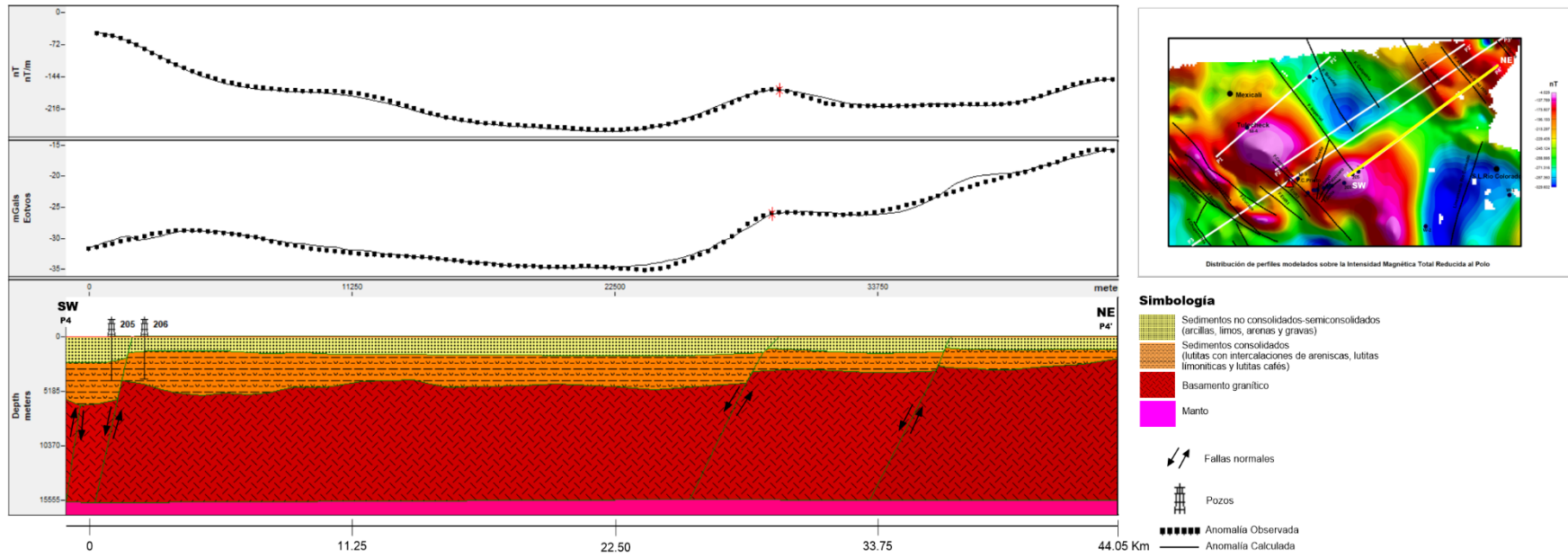


Figura.- 57 Modelo magnético y gravimétrico del Perfil Imperial-Algodones (P4-P4').

Conclusiones

Los resultados de la integración e interpretación de datos geofísicos y geológicos realizados en este trabajo coinciden que el área Laguna Salada-Algodones, Baja California tiene un posible alto potencial geotérmico, con fundamento en el marco geológico del área. La aplicación de los procesos o filtros matemáticos (reducción al Polo, separación residual-regional, derivada vertical, gradiente horizontal total y señal analítica) a los datos magnéticos y gravimétricos permitió realzar las anomalías asociadas a zonas con posible interés geotérmico.

La interpretación magnética y gravimétrica fue de utilidad para identificar: bordes, contactos litológicos, zonas de fallas y/o fracturas, así como también para definir el modelo geológico estructural del subsuelo permitiendo conocer la fuente regional profunda que dio origen a los afloramientos presentes en la zona como al complejo volcánico Cerro Prieto y a las posibles estructuras asociadas a los altos contrastes de densidad.

Los resultados obtenidos de estos estudios geofísicos proporcionaron la suficiente información de manera regional para caracterizar la región Mexicali- Algodones.

Mediante el modelado de los perfiles, principalmente el perfil de interés P3-P3' "Laguna Salada-Algodones" (Figura 56) continuación del modelo propuesto por SGM , se propusieron los horizontes al no contar con la información necesaria de espesores a partir de un modelo regional y al ajuste de las curvas observadas con las geometría de las estructuras propuestas teniendo un ajuste aceptable; se determino que hacia el Noreste hay un levantamiento del basamento por lo que se asocia a los altos magnéticos, teniendo un ambiente geológico-estructural y anomalías magnéticas y gravimétricas con gran similitud al que se observa en el Campo Cerro Prieto.

El análisis geológico-estructural de la zona de estudio arrojó una base más sólida de los resultados obtenidos ya que toda la zona de estudio se encuentra en su mayoría fallada y fracturada. Los principales patrones y fallas nos muestran puntos de debilidad de la corteza terrestre, combinado con la geología del lugar algunos de estos puntos están ubicados sobre altos magnéticos y gravimétricos, con base en estas características que muestra la región Mexicali-Algodones en semejanza con

el Campo Cerro Prieto, este lugar puede tener un alto potencial geotérmico; sin embargo aunque no se cuenta con manifestaciones hidrotermales o una fuente de calor representativa como un volcán cercano ya que estos son una evidencia indirecta asociados a cámaras magmáticas, se infiere que por ser un sitio de debilidad cortical puede ascender magma progresivamente hacia la superficie y por consecuente crear un volcán o dar indicios de manifestaciones hidrotermales todo esto con base en los altos magnéticos que se observan en el área y la posible reactivación del basamento. Finalmente se propuso en conjunto un modelo geotérmico similar al del Campo Cerro Prieto (Anexo 4) con los posibles sitios donde se pueden perforar pozos exploratorios para la búsqueda de este potencial geotérmico.

Recomendaciones

Se recomienda realizar adquisición de datos geofísicos y geológicos a detalle en puntos o zonas específicas, empleado los métodos de: magnetometría, gravimetría, sondeos transitorios electromagnéticos (TEMS), Métodos magnetotelúricos (MT) y sísmica de reflexión ya que en este trabajo se manejo la información aeromagnética y gravimétrica de manera regional; así como hacer estudios de sismicidad, estructurales apoyándose en resultados de geoquímica, geología de pozos si es que los hay cercanos al poblado Vicente Guerrero debido a que no se conto con esta información, si no hay información litológica de pozos para la corroboración de los espesores de las capas se recomienda una programación de estos mismos para tener un mejor sustento en la información.

Bibliografía

- Álamo, G. T. (1994). *Vocabulario Geomorfológico*. Madrid, España: Akal, S.A.
- Alatorre Zamora, M. A., Rosas Elguera, J., Pérez Rodríguez, G., Campos Enríquez, J. O., & Maciel Flores, R. (2012). Contribución de la deconcolución de euler y la señal analítica en 3D al análisis de riesgos por fallas en el graben de Valle de Banderas. *e-Gnosis*, 32.
- Alatorre-Zamora, M., Rosas-Elguera, J., Pérez-Rodríguez, G., Campos-Enríquez, J., & Maciel-Flores, R. (2012). Contribución de la deconvolución de Euler y la señal analítica en 3D al análisis de riesgos por fallas en el Graben de Valle de Banderas. *e-Gnosis [Online] Vol, Art 1, 2-31*.
- Arecco, M. A., Pizarra, G., & Ruiz, F. (2014). Aplicación del Método Gravimétrico en el margen Argentino. *GEOACTA* 39, 10.
- Arellano Gómez, V. M., Iglesias Rodríguez, E., & García Gutiérrez, A. (Julio-Septiembre de 2008). *La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura*. Obtenido de <https://www.ineel.mx › boletin032008 › tendencias>
- Barajas, A. M. (Diciembre de 2014). *The geological foundations of the Gulf of California region*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/305682057>
- Blakely, R. (1996). *Potencial theory in gravity and magnetic applications*. Nueva York, USA.: Cambridge University Press.
- Caballero Miranda, C. I. (2011). La fabrica magnética a partir de la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS): sus bases generales y ejemplos como auxiliar para determinar direcciones, fuentes y dinámicas de flujo. *Monografías del Instituto de Geofísica*, 64.
- Capetti, G. (18 de Febrero de 2016). *100 años de Geotermia en Larderello Desde la explotación intensiva a la producción sustentable*. Obtenido de https://ambcittadelmessico.esteri.it › 2016/02 › g_cappetti_-geo_mex.pdf
- Cárdenas Contreras, A., & Castillo López, L. (03 de mayo de 2013). *Interpretación de datos gravimétricos con la señal analítica 3D. Estudio de caso: Los Naranjos-Facatativa (Colombia)*. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/3229/3689>
- Cárdenas Contreras, A., & Castillo López, L. A. (2013). Interpretación de datos gravimétricos con la señal analítica 3D. Estudio de caso: Los Naranjos- Facatativá (Colombia). *Boletín de Geología*.
- Carranza Cacho, Y. (2018). Estado de la Energía Geotérmica en México. *Petroquimex-La Revista de la Industria Energética*, 1-7.
- Casardi, P. (18 de Febrero de 2016). *Geotermia en Italia: Un siglo de energía limpia*. Obtenido de www.esteri.it › mae › approfondimenti › inserto_df_geotermia

- Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, CeMIEGeo. (2014-2019). *Geotermia en México*. Recuperado el 20 de Enero de 2019, de <http://www.cemiegeo.org/index.php/geotermia-en-mexico>
- Consejo de Recursos Minerales. (2001). *Informe Geológico-Minero de la carta Mexicali*. Hermosillo, Sonora: Gerencia de Geología y Geoquímica- Oficina regional Hermosillo.
- Cortés Guerrero , P. (Noviembre de 2014). *Ubicación espacial y estimación de la profundidad de anomalías gravimétricas mediante la señal analítica y las componentes tensoriales del campo gravitacional*. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5811/TESIS.pdf?sequence=1>
- Dobrin, M., & Savit, C. (1988). *Introduction to geophysical prospecting*. University of Houston: McGraw.Hill book company.
- Dobrin, M., & Savit, C. (1988). *Introduction to geophysical prospecting*. Singapore: McGraw-Hill .
- Domínguez A., B; Sánchez G, G.;. (s.f.). *Comentarios de algunos problemas de perforación y terminación de pozos geotermicos en Cerro Prieto*. Comisión Federal de Electricidad, Coordinación ejecutiva de Cerro Prieto, Mexicali, México, Mexicali, Baja California.
- Escorza Reyes, M. (2010). *Magnetometría de la Isla Socorro, archipiélago de las Revillagigedo*. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1296/Tesis.pdf?sequence=1>
- Espinoza, H. A., & Mooser, F. (1964). El pozo M-3 del Campo Geotermico del Cerro Prieto, B.C., México. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 1-16.
- Fonseca, H., Díaz, C, E., Puente, C. I., & de la Peña, L. (s.f.). *Extensión del Campo de Cerro Prieto y futuras zonas con probabilidad geotermica en el Valle de Mexicali*.
- Gobierno del Estado de Baja California. (2015). *bajacalifornia.gob.mx*. Recuperado el 29 de Octubre de 2018, de http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/municipios/mexicali/medio_fisico.jsp
- Hernández Márquez, J. O. (2016). *Interpretación de datos gravimétricos en el Valle de Mexicali, B.C. Ensenada, Baja California, México*.
- Ikediobi, U. (Agosto de 2013). *Crustal Structure of the Salton Trough: Constraint from Gravity Modeling*. Obtenido de <https://uh-ir.tdl.org/handle/IKEDIABI-THESIS-2013>
- INEGI . (2001). *Síntesis de Información geográfica del estado de Baja California*.
- Instituto Mexicano del Petróleo . (7 de Julio de 2015). *"Programa de inducción para egresados en Ingeniería Petrolera y Geociencias 2014"*. Obtenido de Gravimetría y Magnetometría: <https://es.slideshare.net/belubel83/gravimetria-y-magnetometria>
- IRENA. (Julio de 2019). *Renewable Energy Statics 2019-IRENA*. Obtenido de <http://www.irena.org>

- Jacoby, W., & Smilde, P. (2009). *Gravity Interpretation*. Alemania: Springer.
- Jefferson Andrew, T. Á. (15 de Noviembre de 2018). *Procesamiento e Interpretación de Datos Gravimétricos de la Región de Parguaza Estado Bolívar*.
- Jerónimo Bayona, R. d. (2015). *Estudio geofísico estructural del complejo volcánico Popocatepetl-Iztaccíhuatl a partir de datos aeromagnéticos*.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Estados Unidos: Blackwell Science.
- Lippmann, M., Goldstein, N., Halfman, S., & Witherspoon, P. (1984). Exploration and Development of the Cerro Prieto Geothermal Field. *Society of Petroleum Engineers*, 1-13.
- Lira Herrera, H. (2005). Actualización del modelo geológico conceptual del campo geotérmico de Cerro Prieto. *Revista Mexicana de Geoenergía*, 37-46.
- López-Loera, H., & Tristán-González, M. (2013). Geología y Magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: Implicaciones tectónicas y geohidrológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 137-156.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Nueva York: Cambridge University Press.
- Maciel Flores, R., & Rosas Elguera, J. (30 de Enero de 1992). *Modelo geológico y evaluación del campo geotérmico La primavera, Jal., México*. Obtenido de <https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://revistas.unam.mx/index.php/geofisica/article/viewFile/39496/35929>
- Magnetic surveying. (2002). En P. Kearey, M. Brooks, & I. Hill, *An introduction to Geophysical Exploration* (págs. 155,156). Blackwell Science.
- Milsom, J. (2003). *Field Geophysics*. Inglaterra: Wiley.
- Mushayandebvu, M., Lesur, v., Reid, A., & Fairhead, J. (2001). *Magnetic source parameters of two-dimensional structures using extended Euler deconvolution*, *Geophysics Vol. 66. No. 3*.
- NOAA. (Diciembre de 2019). *US/UK World Magnetic Model - Epoch 2020.0- Main Field Total Intensity (F)*. Obtenido de <https://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>
- NOAA. (06 de January de 2020). *Space Weather Prediction Center*. Obtenido de Real Time Solar Wind: <https://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind>
- Ortiz, P. A. (2015). *Identificación de estructuras hidrogeológicas con apoyo de la técnica geofísica de magnetometría aérea*. México D.F.
- Pacheco, M., Barajas, A. M., Elders, W., Espinoza Cardeña, J. M., Helenes, J., & Segura, A. (2006). Stratigraphy and structure of the Altar basin of NW Sonora: Implications for the history of the Colorado River delta and the Salton trough. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 1-22.

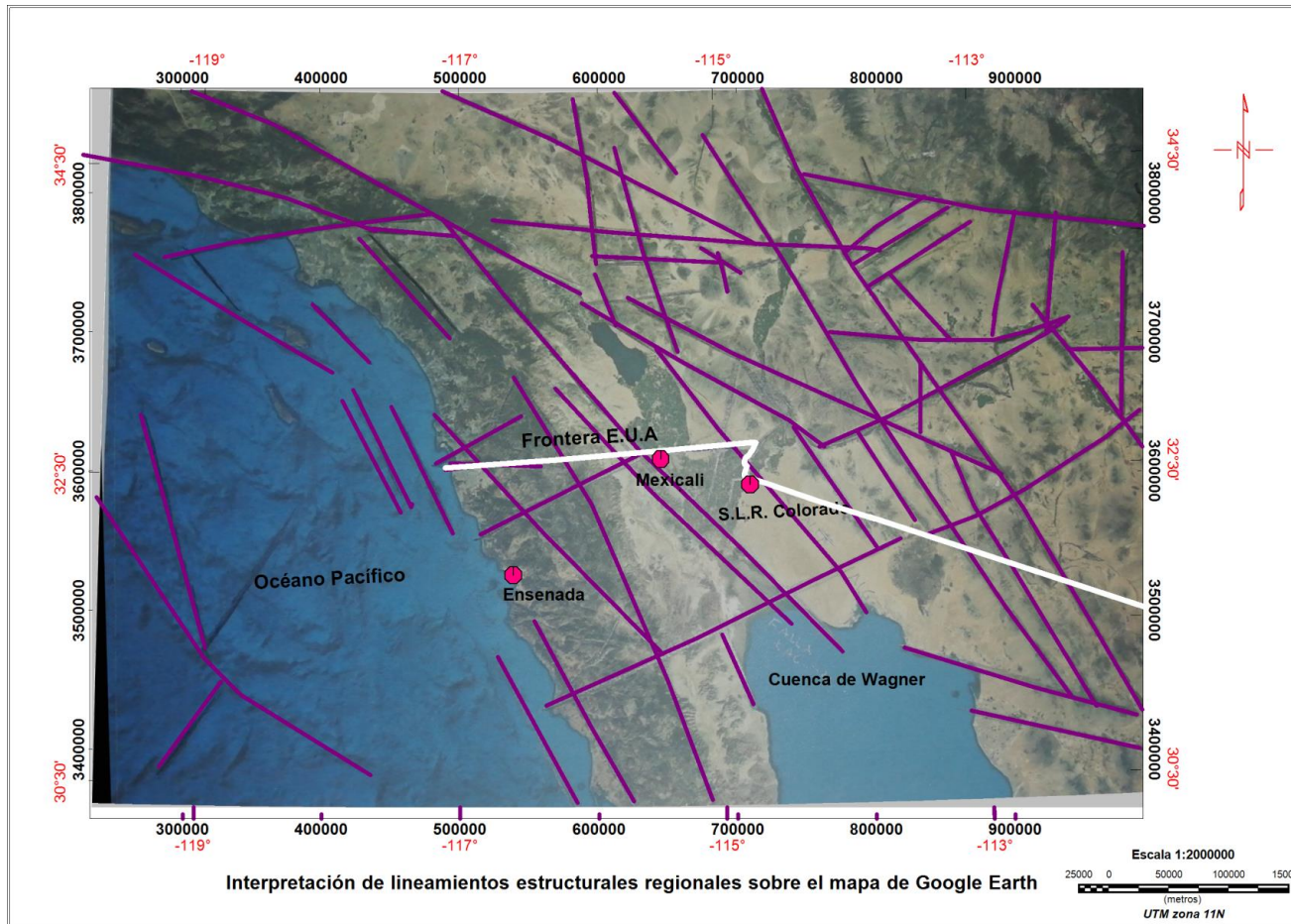
- Pagán Santini, R. H., & Rappo Miguez, S. E. (25 de Marzo de 2015). *Privatización del agua, utilidad pública y generación de energía eléctrica*. Obtenido de <https://estrellasur.wordpress.com/tag/geotermicos-hidrotermales/>
- Peláez Zapata, R. (25 de Julio de 2017). *Geotermia en México, Un potencial de Energía Inagotable*. Obtenido de <https://petroquimex.com/geotermia-en-mexico-un-potencial-de-energia-inagotable/>
- PEMEX & IMP. (s.f.). *Métodos geofísicos en la exploración petrolera*.
- Pérez Orrego, C. E. (2017). *Modelado e interpretación de datos magnéticos y gravimétricos en la caracterización de un depósito tipo IOCG*. Santiago, Chile.
- Puente C., I., & de la Peña L., A. (Septiembre de 1978). *Geología del Campo Geotérmico de Cerro Prieto*. Obtenido de <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/DOE-CFE/1978/Puente.pdf>
- Roldan-Quintana, J. (1982). Evolucion tectónica del Estado de Sonora. *Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología*, 178-185.
- Roy Kumar, K. (2008). *Potencial Theory in Applied Geophysics*. Calcutta-India: Springer.
- Santoyo Gutiérrez, E., & Torres Alvarado, I. S. (1 de Octubre de 2010). *Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable*. Obtenido de <http://www.revista.unam.mx/vol.11/num10/art95/art95.pdf>
- Saume B., M. A., Omaña G, I. D., & Padrón M, C. E. (Septiembre de 2015). *Modelado cortical con datos gravimétricos y magnéticos entre plataforma Deltana y prisma de Barbados*. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0798-40652015000300004&script=sci_arttext
- Servicio Geológico Mexicano. (Junio de 2001). *Carta Magnética de Campo Total Mexicali I11-12 Estado de Baja California- Escala 1:250000*. Obtenido de <http://www.sgm.gob.mx/cartas/Magnetica250.jsp>
- Servicio Geológico Mexicano. (Agosto de 2003). *Carta geológico-minera Mexicali, I11-12 Baja California y Sonora*. Obtenido de http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed.jsp
- Siñeriz, J. (1928). *Los métodos geofísicos de prospección y sus aplicaciones a la resolución de varios problemas geológico-tectónicos*. Madrid.
- Space Weather Prediction Center. (27 de Febrero de 2020). *Space WeatherLive.com*. Obtenido de Progresión del Ciclo Solar: spaceweatherlive.com/es/actividad-solar/ciclo-solar
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*. Nueva York, USA: Cambridge University Press.
- Teran Ortega, L., Peña Leal, J., Contreras Orantes, V., & García Duarte, R. (2001). *Informe geológico-minero de la carta Mexicali, Estados de Sonora y Baja California*.

Ticó Montes de Oca, D. F. (2018). *Geofísica de Exploración para evaluación preliminar del potencial geotérmico en Laguna Salada, Mexicali B.C., México*. Ciudad de México: Ciudad Universitaria.

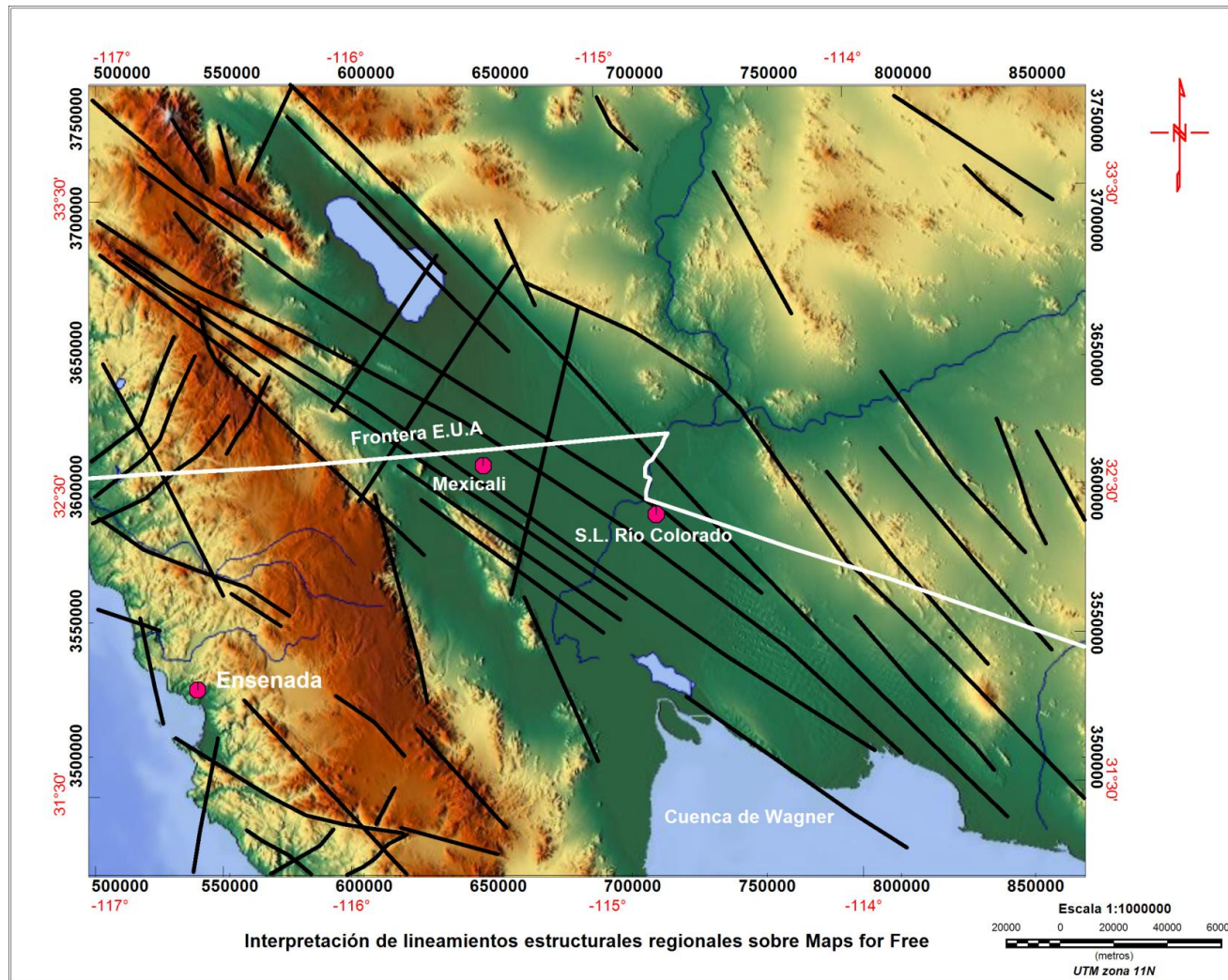
Velasco Hernández, J. (1963). *Levantamiento gravimétrico: zona geotérmica de Mexicali California*. México, D.F.: SIGMA-ORM.

Villalaín Santamaría, J. J. (2016). *La historia del campo magnético terrestre registrada en las rocas*. Obtenido de Fundamentos del Paleomagnetismo.: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/viewFile/328852/419450>

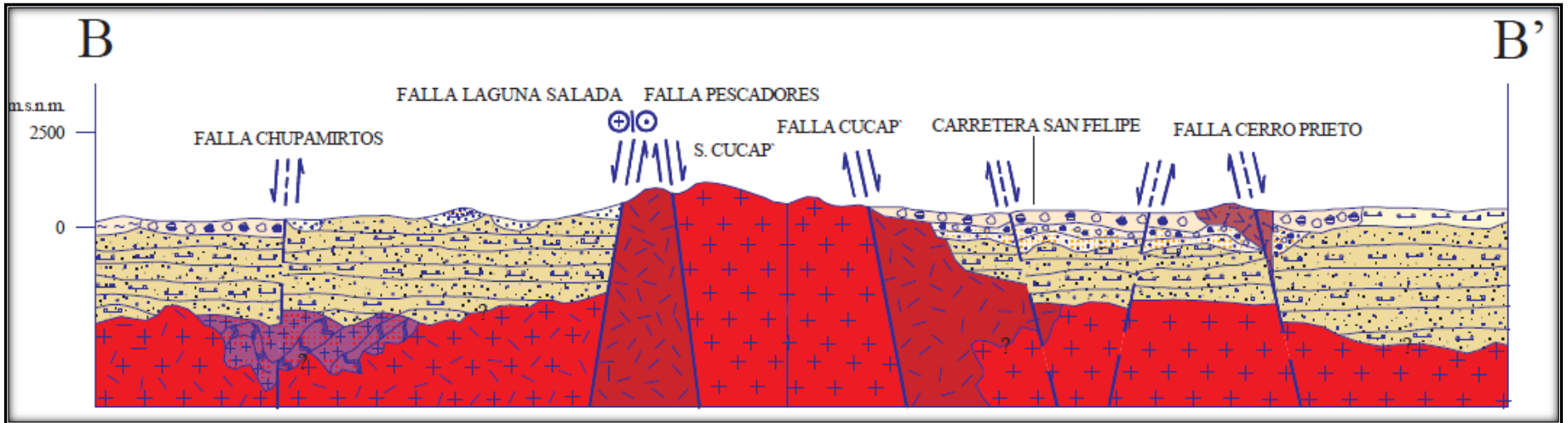
ANEXOS



Anexo 1.- Interpretación de lineamientos estructurales regionales sobre el mapa de Google Earth (2019). Se muestran los lineamientos interpretados (líneas moradas). Se visualizan las localidades principales: Ensenada, San Luis Río Colorado, Mexicali (puntos rosas) y la frontera México-Estados Unidos (línea blanca).

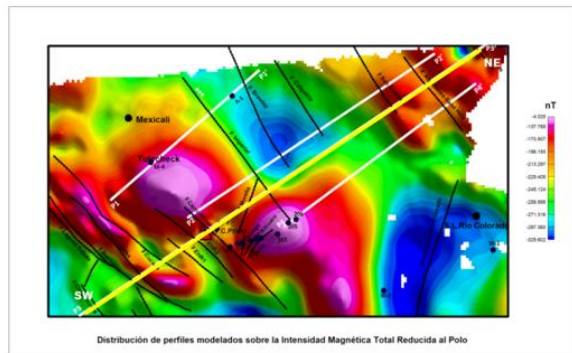
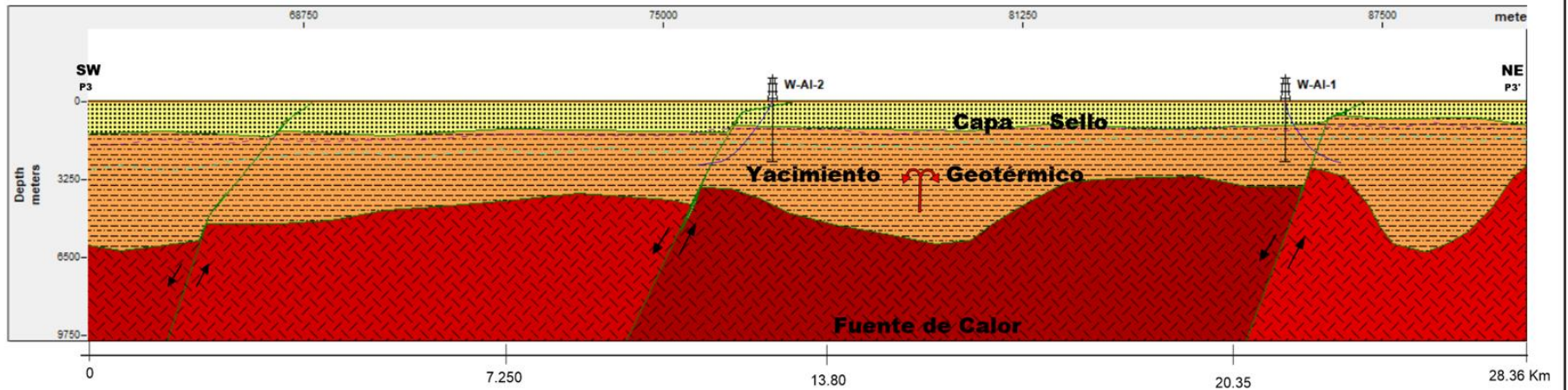


Anexo 2.- Interpretación de lineamientos estructurales regionales sobre Maps for Free (<https://maps-for-free.com/>). Se muestran los lineamientos interpretados (líneas negras). Se visualizan las localidades principales: Ensenada, Mexicali, San Luis Río Colorado (puntos rosas) y la frontera México-Estados Unidos (línea blanca).



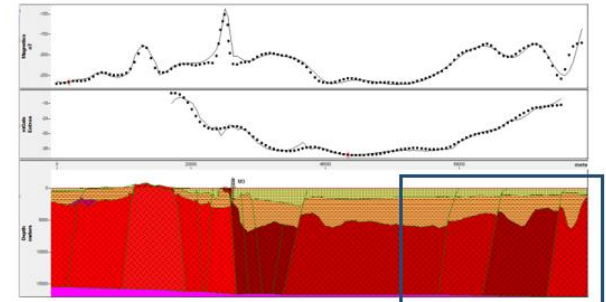
Anexo 3.- Sección Geológica-Carta Mexicali I11-12 (Servicio Geológico Mexicano, 2003).

Modelo Geotérmico Mexicali-Algodones

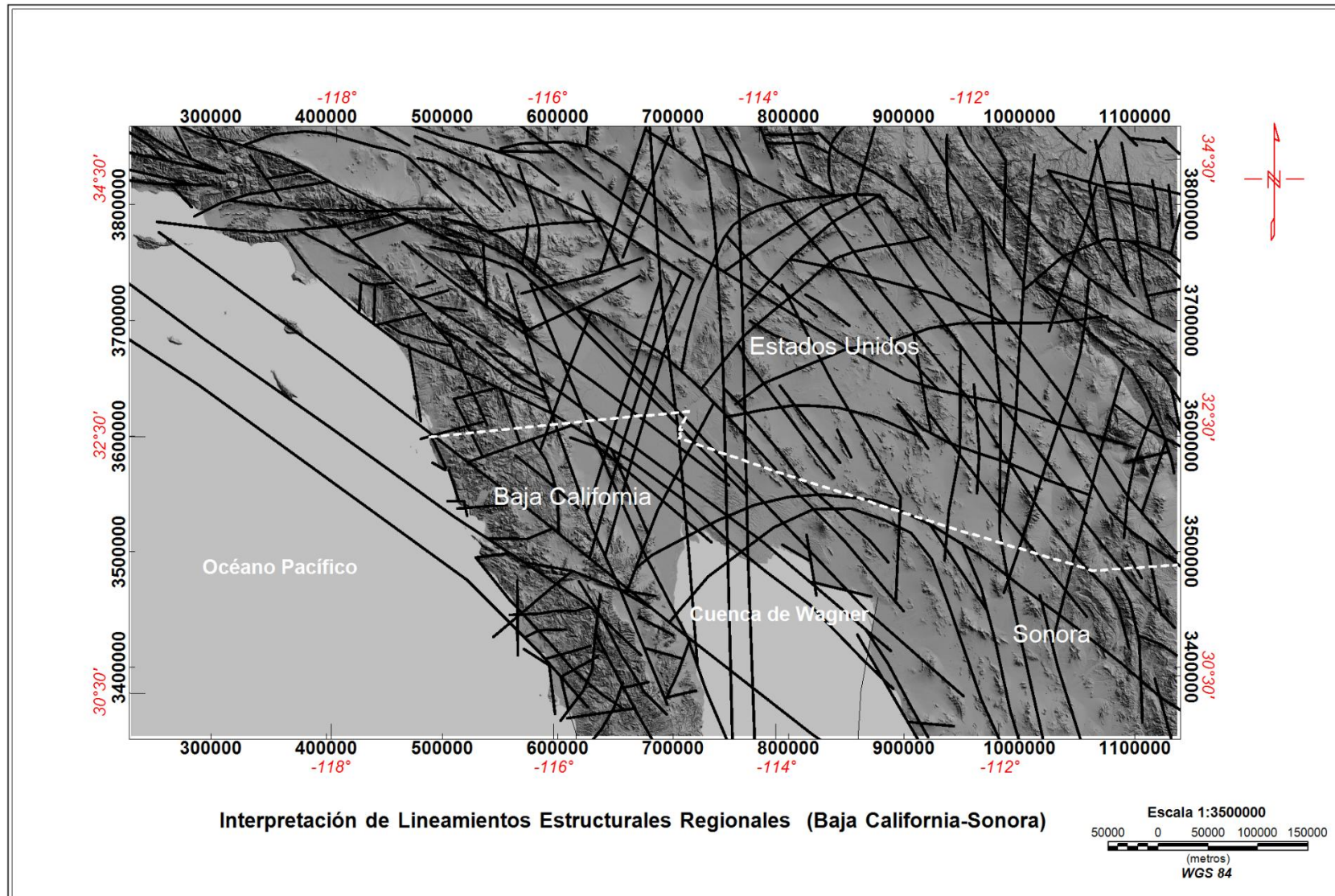


Simbología

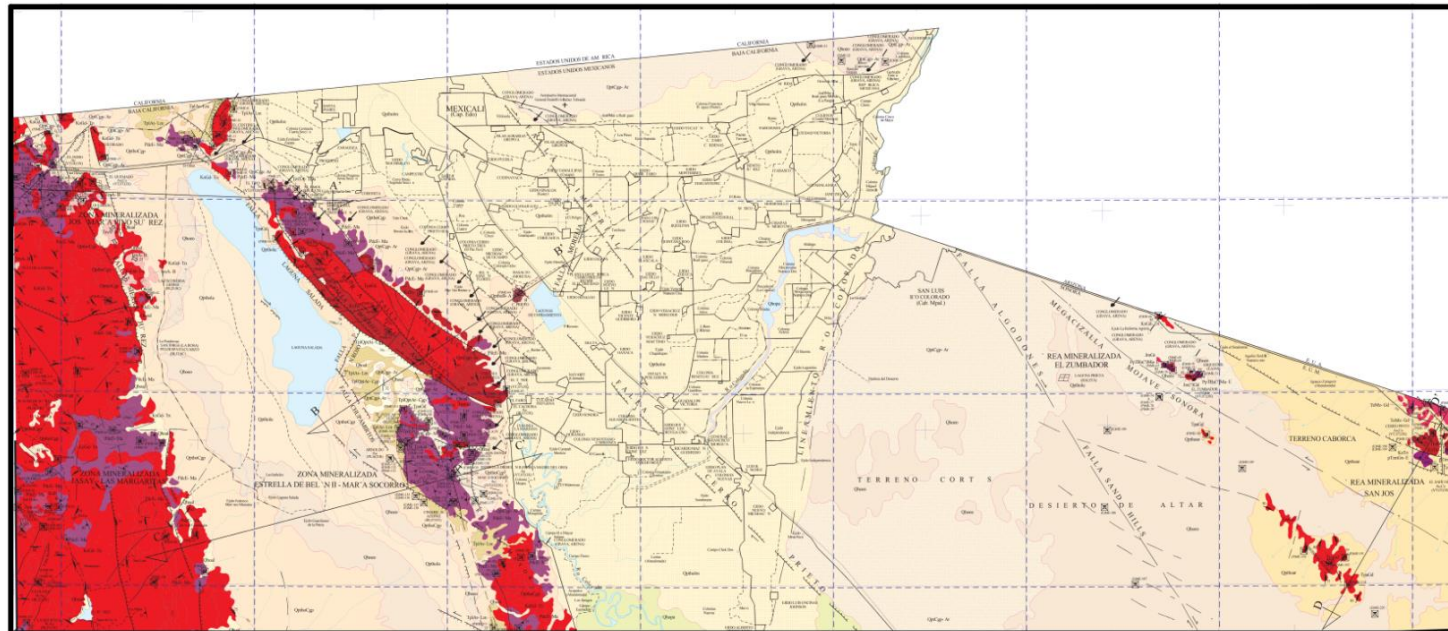
- Sedimentos no consolidados-semiconsolidados (arcillas, limos, arenas y gravas)
- Sedimentos consolidados (lutitas con intercalaciones de areniscas, lutitas limoníticas y lutitas cafés)
- Basamento granítico
- Fallas normales
- Convección
- Pozos



Anexo 4.- Propuesta del Modelo Geotérmico Mexicali-Algodones.



Anexo.- 5 Interpretación de Lineamientos Estructurales Regionales (Baja California-Sonora). Se observan lineamientos estructurales interpretados (Líneas negras) y el límite de frontera México-Estados Unidos (Línea punteada blanca).



Mapa Geológico de Mexicali

CUATERNARIO	
Qboc	OLÉICO
Qbol	ALUVIÓN
Qbop	PALUSTRE
Qbosa	ARENA
Qbbs	LEÑO
Qbbsl	LACUSTRE
Qbpcp	CONGLOMERADO POLIHÉTRICO
Qbbsa	BASALTO - ANDESITA
Qbpcp	CONGLOMERADO POLIHÉTRICO - ARENOSA
TERCIARIO	
NEÓGENO	
Tp3Qc	ARENISCA - CONGLOMERADO POLIHÉTRICO
Tp3Cp	ARENISCA POLIHÉTRICA
Tp3L	ARENISCA - LIMOLITA
Tp3TA	TOBA ANDÉSITICA - TOBA DACTÍLICA
Tp3A	ANDESITA - BASALTO
TRIÁSICO - PÉRMICO	
Tp3M	MÁRMOL - ESQUISTO
CARBONÍFERO - DEVÓNICO	
Tp3E	ESQUISTO - MÁRMOL
PROTEROZOICO	
Tp3E	GNESIS - ESQUISTO
ROCAS ÍGNEAS INTRUSIVAS	
Tp3G	MIENZOBLITA - GRANODIORITA
Tp3G	GRANODIORITA
Tp3G	TONALITA
Tp3G	GRANODIORITA - TONALITA
Tp3G	DIORITA
Tp3G	GRANITO
Tp3G	GRANODIORITA

Anexo.- 6 Mapa Geológico de Mexicali (Servicio Geológico Mexicano, 2003).